



**REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA PREDIÇÃO DA
VIDA ÚTIL DE MADEIRAS DA AMAZÔNIA EM CAMPO
DE APODRECIMENTO**

**ELIAN MENESES OLIVEIRA
TESE DE DOUTORADO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**REDES NEURAS ARTIFICIAIS PARA PREDIÇÃO DA VIDA ÚTIL
DE MADEIRAS DA AMAZÔNIA EM CAMPO DE
APODRECIMENTO**

ELIAN MENESES OLIVEIRA

ORIENTADOR: PROF. DR. ALEXANDRE FLORIAN DA COSTA
COORIENTADOR: PROF. DR. EDER PEREIRA MIGUEL

TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

JULHO – 2020

Brasília – DF

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA PREDIÇÃO DA VIDA ÚTIL DE
MADEIRAS DA AMAZÔNIA EM CAMPO DE APODRECIMENTO**

ELIAN MENESES OLIVEIRA

TESE DE DOUTORADO ACADÊMICO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:

Profº Dr. Alexandre Florian da Costa (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);
(Orientador)

Profº Dr. Ailton Teixeira do Vale (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB)
(Examinador interno)

Ph.D. Divino Eterno Teixeira (Serviço Florestal Brasileiro – SFB)
(Examinador externo)

Dr. Alessandro César de Oliveira Moreira (Serviço Florestal Brasileiro – SFB)
(Examinador externo)

Profº Dr. Joaquim Carlos Gonzalez (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB)
(Examinador suplente)

Profº Dr. Carlos Roberto Sette (Departamento de Engenharia Florestal – UFG)
(Examinador suplente)

Brasília – DF, julho de 2020.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O48r Oliveira, Elian Meneses
 REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS PARA PREDIÇÃO DA VIDA ÚTIL DE MADEIRAS DA AMAZÔNIA EM CAMPO DE APODRECIMENTO / Elian Meneses Oliveira; orientador Alexandre Florian da Costa; co-orientador Eder Pereira Miguel. -- Brasília, 2020. 141 p.

 Tese (Doutorado - Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, 2020.

 1. inteligência artificial. 2. biodeterioração. 3. durabilidade natural. 4. ondas ultrassônicas. 5. espectroscopia de infravermelho próximo. I. Florian da Costa, Alexandre, orient. II. Pereira Miguel, Eder, co orient. III. Título.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter renovado minhas forças a cada dia para concluir este trabalho.

Aos meus pais, ao meu irmão e aos meus primos, que tanto me incentivaram e me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, professor Alexandre Florian, pela amizade, pela confiança e por ter acreditado em mim incondicionalmente.

Ao meu coorientador, professor Eder Pereira Miguel, pelo apoio e pelos conhecimentos transmitidos.

Ao professor Ricardo Faustino Teles, pelo apoio integral desde a concepção do projeto, pelo auxílio material e pelos conhecimentos direcionados a mim.

Ao professor Jez Willian Batista Braga, pelo auxílio material e pela prontidão em me ajudar sempre que necessário.

Ao senhor Sebastião e ao senhor Geraldo, por todo o apoio e trabalho árduo em cada etapa de avaliação em campo.

À Universidade de Brasília e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGEFL), pela incrível oportunidade que tanto contribuiu para meu crescimento profissional.

Ao Laboratório de Produtos Florestais, do Serviço Florestal Brasileiro, por autorizar o uso de equipamentos e laboratórios.

À Montana Química S.A, pela presteza em realizar as avaliações químicas do CCA-C e das amostras de madeiras tratadas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

Dedico este trabalho aos meus pais.

RESUMO

REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA PREDIÇÃO DA VIDA ÚTIL DE MADEIRAS DA AMAZÔNIA EM CAMPO DE APODRECIMENTO

Autor: Elian Meneses Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Florian da Costa

Coorientador: Prof. Dr. Eder Pereira Miguel

Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais

Brasília, Julho de 2020

Este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicação de inteligência artificial, por meio de redes neurais artificiais, para a predição da vida útil de madeiras não tratadas quimicamente e tratadas com arseniato de cobre cromatado (CCA) tipo C, instaladas em campo de apodrecimento em área de Cerrado do Distrito Federal. O teste em campo foi conduzido durante 40 meses, utilizando estacas das madeiras de sumaúma (*Ceiba pentandra*), marupá (*Simarouba amara*), curupixá (*Micropholis melinoniana*) e cerejeira (*Amburana cearensis*), cujos desempenhos foram avaliados através da perda de massa e das técnicas não destrutivas de ultrassom e espectroscopia no infravermelho próximo. O preservante químico CCA-C conferiu alta proteção às madeiras contra o ataque de fungos e insetos xilófagos, principalmente às espécies de baixa durabilidade natural. Dentre as madeiras não tratadas quimicamente, a cerejeira apresentou a maior resistência natural, possivelmente devido ao seu alto teor de extrativos. De modo geral, a velocidade de propagação da onda ultrassônica apresentou tendência de decréscimo para as madeiras não tratadas, enquanto que nas amostras com CCA-A mostrou maior estabilidade ao longo do período de exposição em campo. Os espectros de infravermelho próximo evidenciaram um consumo mais significativo da celulose, sobretudo nas amostras de madeiras não tratadas quimicamente. As redes neurais, do tipo MLP (do inglês *Multilayer Perceptron*), utilizando como variáveis preditoras dados provenientes das avaliações não destrutivas de ultrassom e espectroscopia no infravermelho próximo foram precisas na estimativa de perda de massa decorrente de biodeterioração e, por conseguinte, da vida útil da madeira. Os erros em torno de 15% validaram a indicação desta ferramenta de inteligência artificial para projeção de perda de massa e de problemas estruturais em estacas de madeiras em serviço.

Palavras-chave: inteligência artificial; biodeterioração; durabilidade natural; ondas ultrassônicas; espectroscopia de infravermelho próximo.

ABSTRACT

ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR LIFE SPAN PREDICTION OF AMAZONIAN WOODS IN FIELD TEST

Author: Elian Meneses Oliveira

Supervisor: Prof. Dr. Alexandre Florian da Costa

Cosupervisor: Prof. Dr. Eder Pereira Miguel

Forest Science Graduate Program

Brasilia, July of 2020

This study aimed to evaluate the application of artificial intelligence, through artificial neural networks, for the prediction of the life span of wood without chemical treatment and chemically treated with copper-chromated-arsenate preservative (CCA) type C, installed in a field test in Federal District Cerrado area. The field test was conducted during 40 months, using stakes of sumaúma (*Ceiba pentandra*), marupá (*Simarouba amara*), curupixá (*Micropholis melinoniana*) and cerejeira (*Amburana cearensis*), whose performances were evaluated through mass loss and nondestructive techniques of ultrasonic waves and near infrared spectroscopy. The wood preservative CCA-C provided high protection to the stakes against fungi and insects attack, mainly those of low natural durability species. Among the nontreated stakes, the cerejeira showed the highest natural resistance, possibly due to its high extractives. In general, the speed of ultrasonic propagation waves showed a decreasing trend for untreated stakes, while in the samples treated with CCA-A there was a greater stability during the period of exposure in the field test. The near infrared spectra showed a more significant consumption of cellulose, especially in nontreated stakes. Artificial neural networks, type MLP (Multilayer Perceptron), using data from ultrasonic evaluations and near infrared spectroscopy as predictive variables were accurate in estimating mass loss due to biodeterioration and, therefore, the life span of the wood. The errors around 15% validated the indication of this artificial intelligence tool for projecting weight loss and structural problems in stakes in service.

Key words: artificial intelligence; biodeterioration; natural durability; ultrasonic waves; near infrared spectroscopy.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
2. OBJETIVOS.....	19
2.1 Objetivo geral.....	19
2.2 Objetivos específicos	19
3. HIPÓTESE	19
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1 Espécies de madeiras	19
4.1.1 Sumaúma – <i>Ceiba pentandra</i>	19
4.1.2 Marupá – <i>Simarouba amara</i>	20
4.1.3 Curupixá – <i>Micropholis melinoniana</i>	21
4.1.4 Cerejeira – <i>Amburana cearensis</i>	21
4.2 Caracterização química da madeira	22
4.3 Biodeterioração da madeira	24
4.4 Preservação da madeira.....	28
4.5 Durabilidade natural da madeira.....	31
4.6 Avaliações não destrutivas.....	33
4.6.1 Ultrassom	34
4.6.2 Espectroscopia de infravermelho.....	37
4.7 Redes neurais artificiais	41
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	48
5.1 Obtenção do material e preparo dos corpos de prova	48
5.2 Determinação da massa específica básica.....	48
5.3 Determinação da composição química	49
5.4 Tratamento químico preservante.....	49
5.5 Determinação da retenção e penetração do produto químico	50
5.6 Delineamento experimental	51
5.7 Ensaio de durabilidade natural.....	51
5.8 Avaliações periódicas	52
5.9 Inspeção visual do estado de sanidade das estacas de madeira	52
5.10 Perda de massa e teor de umidade das estacas de madeira	53
5.11 Avaliação não destrutiva por ondas ultrassônicas	54
5.12 Análise dos dados	55
5.13 Avaliação não destrutiva por espectroscopia de infravermelho	55

5.14 Estimativa da vida útil da madeira por redes neurais artificiais	56
5.14.1 Treinamento das redes neurais artificiais.....	56
5.14.2 Validação das redes neurais artificiais.....	58
5.15 Vida útil	59
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
6.1 Massa específica e teor de extrativos.....	59
6.2 Retenção e penetração.....	59
6.3 Ensaio de durabilidade natural.....	62
6.3.1 Avaliação visual.....	62
6.3.2 Perda de massa.....	71
6.4 Avaliação não destrutiva por ultrassom.....	74
6.4.1 Velocidade de propagação no sentido transversal	74
6.5 Avaliação não destrutiva por espectroscopia no infravermelho próximo.....	80
6.6 Predição da vida útil por redes neurais artificiais	89
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
APÊNDICE	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Espécies de madeiras estudadas.....	48
Tabela 2. Delineamento experimental.	51
Tabela 3. Total de avaliações realizadas nas amostras instaladas no campo de apodrecimento após sua implantação.	52
Tabela 4. Avaliações anuais realizadas nas amostras instaladas no campo de apodrecimento após sua implantação.	52
Tabela 5. Sistema de classificação da análise visual baseado na porcentagem de deterioração da seção transversal ASTM D 1758 (ASTM, 2006).	53
Tabela 6. Número de neurônios utilizados para treinamento das redes neurais artificiais.	57
Tabela 7. Massa específica básica e teor de extrativos das espécies de madeira estudadas (ASTM D2395-14, TAPPI-T 204 om-88).....	59
Tabela 8. Resultados da análise química da solução de CCA-C utilizada para tratamento das amostras.	60
Tabela 9. Resultados da análise de retenção e penetração dos ingredientes ativos de CCA-C nas amostras tratadas das quatro espécies de madeiras (NBR 6232 – ABNT, 2013).	60
Tabela 10. Bandas referentes aos principais componentes químicos da madeira obtidas com MicroNIR™ (SCHWANNINGER et al., 2011; SOARES et al., 2017; SILVA, 2018).....	81
Tabela 11. Características e estatísticas de precisão das redes neurais artificiais, do tipo MLP, selecionadas para predição da perda de massa em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica.....	90
Tabela 12. Características e estatísticas de precisão das redes neurais artificiais, do tipo MLP, selecionadas para predição da perda de massa em função dos espectros de infravermelho próximo.	93
Tabela 13. Resumo das estimativas de perda de massa realizadas após a generalização... ..	97

LISTA DE TABELAS - APÊNDICE

Tabela 1. Análise descritiva da massa de sumaúma sem tratamento e tratada com CCA em campo de apodrecimento.	116
Tabela 2. Análise descritiva da massa de marupá sem tratamento e tratada com CCA em campo de apodrecimento.	116
Tabela 3. Análise descritiva da massa de curupixá sem tratamento e tratada com CCA em campo de apodrecimento.	117
Tabela 4. Análise descritiva da massa de cerejeira sem tratamento e tratada com CCA em campo de apodrecimento.	117
Tabela 5. Teste de Friedman para massa de sumaúma em relação ao tratamento químico.	118

Tabela 6. Teste de Friedman para massa de marupá em relação ao tratamento químico..	118
Tabela 7. Teste de Friedman para massa de curupixá em relação ao tratamento químico.	118
Tabela 8. Teste de Friedman para massa de cerejeira em relação ao tratamento químico.	118
Tabela 9. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para massa de sumaúma sem tratamento (1) e tratadas com CCA (2).	119
Tabela 10. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para massa de marupá sem tratamento (1) e tratadas com CCA (2).	119
Tabela 11. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para massa de curupixá sem tratamento (1) e tratadas com CCA (2).	120
Tabela 12. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para massa de cerejeira sem tratamento (1) e tratadas com CCA (2).	120
Tabela 13. Teste de Friedman para massa de sumaúma sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.....	121
Tabela 14. Teste de Friedman para massa de marupá sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.....	121
Tabela 15. Teste de Friedman para massa de curupixá sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.....	122
Tabela 16. Teste de Friedman para massa de cerejeira sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.....	122
Tabela 17. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para massa de sumaúma sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.	123
Tabela 18. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para massa de marupá sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.	124
Tabela 19. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para massa de curupixá sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.	125
Tabela 20. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para massa de cerejeira sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.	126
Tabela 21. Análise descritiva da velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de sumaúma sem tratamento e tratada com CCA em campo de apodrecimento.....	127
Tabela 22. Análise descritiva da velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de marupá sem tratamento e tratada com CCA em campo de apodrecimento.....	127
Tabela 23. Análise descritiva da velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de curupixá sem tratamento e tratada com CCA em campo de apodrecimento.	128
Tabela 24. Análise descritiva da velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de cerejeira sem tratamento e tratada com CCA em campo de apodrecimento.	128

Tabela 25. Teste de Friedman para efeito do tratamento com CCA na velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de sumaúma nos sentidos transversal (TR) e longitudinal (LL).	129
Tabela 26. Teste de Friedman para efeito do tratamento com CCA na velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de marupá nos sentidos transversal (TR) e longitudinal (LL).	129
Tabela 27. Teste de Friedman para efeito do tratamento com CCA na velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de curupixá nos sentidos transversal (TR) e longitudinal (LL).	130
Tabela 28. Teste de Friedman para efeito do tratamento com CCA na velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de cerejeira nos sentidos transversal (TR) e longitudinal (LL).	130
Tabela 29. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para efeito do tratamento com CCA na velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de sumaúma nos sentidos transversal (TR) e longitudinal (LL).	131
Tabela 30. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para efeito do tratamento com CCA na velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de marupá nos sentidos transversal (TR) e longitudinal (LL).	131
Tabela 31. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para efeito do tratamento com CCA na velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de curupixá nos sentidos transversal (TR) e longitudinal (LL).	132
Tabela 32. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para efeito do tratamento com CCA na velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de cerejeira nos sentidos transversal (TR) e longitudinal (LL).	132
Tabela 33. Teste de Friedman para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de sumaúma em relação ao tratamento químico.....	133
Tabela 34. Teste de Friedman para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de marupá em relação ao tratamento químico.	133
Tabela 35. Teste de Friedman para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de curupixá em relação ao tratamento químico.	133
Tabela 36. Teste de Friedman para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de cerejeira em relação ao tratamento químico.	133
Tabela 37. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de sumaúma sem tratamento (1) e tratadas com CCA (2).	134
Tabela 38. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de marupá sem tratamento (1) e tratadas com CCA (2).....	134
Tabela 39. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de curupixá sem tratamento (1) e tratadas com CCA (2)...	135
Tabela 40. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de cerejeira sem tratamento (1) e tratadas com CCA (2)...	135

Tabela 41. Teste de Friedman para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de sumaúma sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.	136
Tabela 42. Teste de Friedman para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de marupá sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.	136
Tabela 43. Teste de Friedman para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de curupixá sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.	137
Tabela 44. Teste de Friedman para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de cerejeira sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.	137
Tabela 45. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de sumaúma sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.	138
Tabela 46. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de marupá sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.	139
Tabela 47. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de curupixá sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.	140
Tabela 48. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de cerejeira sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.	141

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquemas de acoplagem de transdutores: (a) direta, (b) semidireta, (c) indireta e (d) superfície curva.....	35
Figura 2. Relação do infravermelho vibracional com outros tipos de radiação (PAVIA et al., 2015).....	38
Figura 3. Regiões aproximadas de absorção das moléculas (PAVIA et al., 2015).....	40
Figura 4. Analogia entre neurônios (a) naturais e (b) artificiais (TAFNER et al., 1996)...	42
Figura 5. Modelo de um neurônio artificial (HAYKIN, 2001).	43
Figura 6. Função sigmóide (HAYKIN, 2001).....	45
Figura 7. Arquitetura de uma rede perceptron de múltiplas camadas com duas camadas ocultas (HAYKIN, 2001).	47
Figura 8. (a) Autoclave industrial para tratamento químico de madeiras; (b) Acomodação das amostras para posterior tratamento sob pressão em autoclave.....	50
Figura 9. Acomodação das amostras para fixação de ingredientes ativos após o tratamento químico.	50
Figura 10. Campo de apodrecimento instalado em maio de 2016 na Fazenda Água Limpa/UnB.	51
Figura 11. Pontos de coleta de dados referentes às ondas ultrassônicas (Adaptado de TELES (2014)).	54
Figura 12. Medição do espectro de absorbância no infravermelho próximo nas estacas de madeira.	56
Figura 13. Análise de penetração do preservante hidrossolúvel CCA-C nas amostras de (a) marupá, (b) cerejeira, (c) curupixá e (d) sumaúma com 0 meses de exposição em campo de apodrecimento.	60
Figura 14. Análise de penetração do preservante hidrossolúvel CCA-C nas amostras de (a) marupá, (b) cerejeira, (c) curupixá e (d) sumaúma após 40 meses de exposição em campo de apodrecimento.	61
Figura 15. Valores médios das notas de análise visual para fungos e cupins referentes à madeira de sumaúma (a) sem tratamento e (b) tratadas com CCA-C.	63
Figura 16. Valores médios das notas de análise visual para fungos e cupins referentes à madeira de marupá (a) sem tratamento e (b) tratadas com CCA-C.....	64
Figura 17. Valores médios das notas de análise visual para fungos e cupins referentes à madeira de curupixá (a) sem tratamento e (b) tratadas com CCA-C.....	65
Figura 18. Valores médios das notas de análise visual para fungos e cupins referentes à madeira de cerejeira (a) sem tratamento e (b) tratadas com CCA-C.....	66
Figura 19. Aspecto visual das amostras de sumaúma sem tratamento químico (a) antes e (b) após exposição em campo de apodrecimento.	67
Figura 20. Aspecto visual das amostras de sumaúma tratadas com CCA-C (a) antes e (b) após exposição em campo de apodrecimento.....	68

Figura 21. Aspecto visual das amostras de marupá sem tratamento químico (a) antes e (b) após exposição em campo de apodrecimento.....	68
Figura 22. Aspecto visual das amostras de marupá tratadas com CCA-C (a) antes e (b) após exposição em campo de apodrecimento.	69
Figura 23. Aspecto visual das amostras de curupixá sem tratamento químico (a) antes e (b) após exposição em campo de apodrecimento.....	69
Figura 24. Aspecto visual das amostras de curupixá tratadas com CCA-C (a) antes e (b) após exposição em campo de apodrecimento.....	70
Figura 25. Aspecto visual das amostras de cerejeira sem tratamento químico (a) antes e (b) após exposição em campo de apodrecimento.....	70
Figura 26. Aspecto visual das amostras de cerejeira tratadas com CCA-C (a) antes e (b) após exposição em campo de apodrecimento.....	71
Figura 27. Valores médios de massa das amostras de sumaúma sem tratamento químico (ST) e tratadas com CCA-C ao longo de 40 meses instaladas em campo de apodrecimento.	71
Figura 28. Valores médios de massa das amostras de marupá sem tratamento químico (ST) e tratadas com CCA-C ao longo de 40 meses instaladas em campo de apodrecimento.....	72
Figura 29. Valores médios de massa das amostras de curupixá sem tratamento químico (ST) e tratadas com CCA-C ao longo de 40 meses instaladas em campo de apodrecimento.	72
Figura 30. Valores médios de massa das amostras de cerejeira sem tratamento químico (ST) e tratadas com CCA-C ao longo de 40 meses instaladas em campo de apodrecimento.....	72
Figura 31. Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no sentido transversal (região de afloramento) para a madeira de sumaúma sem tratamento químico (ST) e tratadas com CCA-C.....	74
Figura 32. Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no sentido transversal (região de afloramento) para a madeira de marupá sem tratamento químico (ST) e tratadas com CCA-C.....	75
Figura 33. Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no sentido transversal (região de afloramento) para a madeira de curupixá sem tratamento químico (ST) e tratadas com CCA-C.....	75
Figura 34. Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no sentido transversal (região de afloramento) para a madeira de cerejeira sem tratamento químico (ST) e tratadas com CCA-C.....	76
Figura 35. Aspecto esponjoso adquirido pela madeira de marupá devido ao processo de biodeterioração.	77
Figura 36. Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no sentido longitudinal para as madeiras de sumaúma, marupá, curupixá e cerejeira sem tratamento químico (ST) e após tratamento com CCA-C.....	78

Figura 37. Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no sentido transversal para as madeiras de sumaúma, marupá, curupixá e cerejeira sem tratamento químico (ST) e após tratamento com CCA-C.....	79
Figura 38. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras sadias e sem tratamento químico de sumaúma, marupá, curupixá e cerejeira (a) sem pré-processamento; e (b) após o pré-processamento de padronização normal de sinal.	80
Figura 39. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de sumaúma sem tratamento químico em cada período de avaliação em campo de apodrecimento.....	82
Figura 40. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de sumaúma tratadas com CCA-C em cada período de avaliação em campo de apodrecimento.....	82
Figura 41. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de marupá sem tratamento químico em cada período de avaliação em campo de apodrecimento.....	83
Figura 42. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de marupá tratadas com CCA-C em cada período de avaliação em campo de apodrecimento.....	83
Figura 43. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de curupixá sem tratamento químico em cada período de avaliação em campo de apodrecimento.....	84
Figura 44. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de curupixá tratadas com CCA-C em cada período de avaliação em campo de apodrecimento.....	84
Figura 45. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de cerejeira sem tratamento químico em cada período de avaliação em campo de apodrecimento.....	85
Figura 46. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de cerejeira tratadas com CCA-C em cada período de avaliação em campo de apodrecimento.....	85
Figura 47. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de sumaúma antes (testemunha) e após três períodos de avaliação em campo (sem tratamento – ST e tratadas com CCA-C).....	88
Figura 48. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de marupá antes (testemunha) e após quatro períodos de avaliação em campo (sem tratamento – ST e tratadas com CCA-C).....	88
Figura 49. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de curupixá antes (testemunha) e após quatro períodos de avaliação em campo (sem tratamento – ST e tratadas com CCA-C).....	89
Figura 50. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de cerejeira antes (testemunha) e após quatro períodos de avaliação em campo (sem tratamento – ST e tratadas com CCA-C).....	89
Figura 51. Arquitetura da RNA2 selecionada para predição de perda de massa. Em que: Na camada de entrada – 1, 2 3 (variáveis categóricas – espécie de madeira, tratamento químico e período de avaliação) e 4 (variável contínua – ultrassom); Na camada oculta – 1 a 15 (números de neurônios); Na camada de saída – PM% (perda de massa predita).....	91
Figura 52. Dispersão dos resíduos percentuais em relação aos valores observados de perda de massa (%) no treinamento da RNA2 em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica.....	92

Figura 53. Relação entre a perda de massa observada e estimada no treinamento da RNA2 em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica.	92
Figura 54. Arquitetura da RNA5 selecionada para predição de perda de massa. Em que: Na camada de entrada – 1, 2 3 (variáveis categóricas – espécie de madeira, tratamento químico e período de avaliação) e 4 (variável contínua – NIR); Na camada oculta – 1 a 17 (números de neurônios); Na camada de saída – PM% (perda de massa predita).	95
Figura 55. Dispersão dos resíduos percentuais em relação aos valores observados de perda de massa (%) no treinamento da RNA5 em função dos espectros de infravermelho próximo.	96
Figura 56. Relação entre a perda de massa observada e estimada no treinamento da RNA5 em função dos espectros de infravermelho próximo.	96

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento, a combinação e o melhoramento das características anatômicas, físicas, mecânicas e químicas da madeira têm proporcionado um uso cada vez mais racional, para os mais diversos fins e com menor desperdício. Esta racionalidade está relacionada com o progresso tecnológico na área florestal e, conseqüentemente, com uma maior qualidade e durabilidade dos materiais produzidos.

Neste sentido, o tratamento preservante de madeiras de menor resistência natural (nativas ou plantadas), por meio da aplicação de produtos químicos, é imprescindível para aumentar sua vida útil, tornando-as mais competitivas no mercado madeireiro (VIDAL et al., 2015).

A resistência natural ou capacidade de resistir à ação de agentes deterioradores, incluindo os agentes biológicos, físicos e químicos está intimamente ligada à vida útil da madeira em serviço, a qual é determinada pelo tempo necessário para que esta seja substituída, estando em contato com o solo ou apenas exposta às intempéries.

Para avaliar a resistência natural da madeira e a eficiência de produtos químicos preservantes e de processos de impregnação, os ensaios em campo são os mais comumente utilizados. Isto se deve à maior fidelidade ao se reproduzir situações da madeira em uso, com ou sem tratamento químico, tais como a exposição a períodos irregulares de lixiviação, secagem, exposição à luz solar, agentes químicos e microrganismos xilófagos presentes no solo (COSTA et al., 2005). Porém, essa metodologia exige o acompanhamento do processo de biodeterioração por longos períodos, em geral superiores a 20 anos.

As normas específicas tradicionalmente empregadas em ensaios de resistência natural em campo de apodrecimento, em geral, levam em consideração os aspectos visuais e a perda de massa das amostras expostas durante longos períodos, ou seja, dependem da destruição da peça. Por outro lado, técnicas alternativas como a propagação de ondas ultrassônicas e a espectroscopia no infravermelho próximo são formas de avaliação não destrutivas, que vêm sendo empregadas mais recentemente na área de preservação de madeira (TELES, 2014).

Seguindo a mesma ótica da avaliação não destrutiva da madeira, as redes neurais artificiais surgem como uma ferramenta de características atrativas, tendo em vista a elevada habilidade em mapear sistemas não-lineares, alta capacidade de aprendizado de comportamentos envolvidos a partir de informações previamente obtidas e o grande potencial para aplicação em sistemas de predição (SILVA et al., 2010). Entretanto, até o

momento não se tem informações, na área de preservação de madeiras, sobre a utilização dessa ferramenta de inteligência artificial para predição da vida útil de madeiras expostas às intempéries e em contato com o solo em área de Cerrado sentido restrito.

Dessa forma, a utilização de técnicas ou ferramentas alternativas que possibilitem a redução do tempo necessário para determinação da vida útil da madeira que possam fornecer resultados confiáveis e práticos, reveste-se de grande importância para a produção de conhecimento e melhor compreensão do uso deste recurso natural renovável.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a aplicação de redes neurais artificiais para a predição da vida útil de madeiras tratadas e não tratadas quimicamente, instaladas em campo de apodrecimento na região de Cerrado do Distrito Federal.

2.2 Objetivos específicos

Monitorar e avaliar o estado de sanidade das espécies madeireiras *Simarouba amara*, *Ceiba pentandra*, *Micropholis melinoniana* e *Amburana cearensis*, tratadas quimicamente com CCA tipo C e não tratadas, em campo de apodrecimento, através de avaliação visual e das técnicas não destrutivas de ultrassom e espectroscopia no infravermelho próximo.

Predizer a vida útil das referidas espécies madeireiras, tratadas quimicamente e não tratadas, instaladas em campo de apodrecimento, por meio de ajustes de modelos de redes neurais artificiais.

3. HIPÓTESE

A vida útil de madeiras instaladas em campo de apodrecimento pode ser predita através de inteligência artificial utilizando a técnica de redes neurais artificiais.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Espécies de madeiras

4.1.1 Sumaúma – *Ceiba pentandra*

Pertencente à família Bombacaceae, a espécie florestal *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. é popularmente conhecida como sumaúma, ceiba, paineira, samaúma-barriguda, samaúma-cabeluda, samaúma-lisa, sumaúma-branca, sumaúma-da-várzea, sumaúma-rosada. Sua distribuição espacial abrange os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará,

além de outros países como África, América Central, Colômbia, Equador, Estados Unidos, Guiana Francesa, Suriname, Venezuela (IPT, s.d.).

É uma árvore de crescimento rápido, atingindo muitas vezes porte gigantesco; podendo chegar até 50 m de altura e 2 m de diâmetro, com amplas sapopemas basais ao redor (SANTOS, 2002).

Sua madeira caracteriza-se por apresentar cerne e alburno indistintos pela cor, branco-rosado a marrom-claro-acinzentado; cheiro (alguns espécimes podem apresentar forte odor desagradável) e gosto imperceptíveis; densidade básica baixa (0,32 g/cm³); alto teor de extrativos (12,32%); grã direita a irregular; textura grossa. Quanto à durabilidade natural, apresenta baixa resistência ao ataque de organismos xilófagos; porém, é bastante permeável à impregnação de soluções preservativas quando submetida a tratamento sob pressão (IPT, s.d.; MATOSKI; ROCHA, 2006).

É considerada uma madeira de fácil trabalhabilidade, secagem rápida, bom acabamento e colagem fácil. É empregada em embalagem, brinquedos, barris de pouca duração, embarcações, chapas compensadas, lâminas de utilidade geral e pasta para celulose (SANTOS, 2002; IPT, s.d.).

4.1.2 Marupá – *Simarouba amara*

O marupá, *Simarouba amara* Aubl., pertencente à família Simaroubaceae, é popularmente conhecido como caixeta, caxeta, marupaúba, paraparaíba, pararaúba, parariúba, pau-paraíba, simaruba e tamanqueira. No Brasil, ocorre nos estados da Amazônia, Acre, Amapá, Mato Grosso, Pará, Rondônia, além de outros países como Bolívia, Colômbia, Equador, Guiana, Guiana Francesa, Peru, Suriname, Venezuela.

Sua madeira possui coloração esbranquiçada a levemente amarelado, com cerne e alburno indistintos pela cor; brilho moderado; cheiro imperceptível e gosto levemente amargo; densidade básica baixa (0,38 g/cm³); baixo teor de extrativos (2,1%); macia ao corte; grã direita; textura média a grossa; superfície lustrosa (IPT, s.d.; CARNEIRO et al, 2009).

É considerada uma madeira suscetível a fungos apodrecedores e cupins, apresentando baixa durabilidade natural. Quanto à tratabilidade, o cerne e o alburno são muito fáceis de impregnar quando submetidos a tratamentos sob pressão (IPT, s.d.).

Ademais, pode ser utilizada para a fabricação de brinquedos, saltos de sapato, caixotaria, forros, fósforos, tamancos, esquadrias, marcenaria em geral, compensado, malas, pasta para papel e celulose, e instrumentos musicais (LOUREIRO et al., 1979).

4.1.3 Curupixá – *Micropholis melinoniana*

A espécie florestal *Micropholis melinoniana* Pierre, conhecida popularmente como curupixá, guajará ou abiurana rosadinha, pertence à família Sapotaceae, e ocorre nos estados do Acre, Amapá, Pará e Roraima (SILVA, 2004).

Sua madeira apresenta densidade básica média (0,58 g/cm³), cor castanho-rosado, grã direita, textura fina, cheiro desagradável, baixo teor de extrativos (2,85%) além de boa trabalhabilidade e bom acabamento (CORADIN et al., 2009; TREVISOR, 2011; AMORIN, 2013). Entretanto, ainda existem poucos dados relevantes na literatura referentes à caracterização química, física e mecânica da madeira, mesmo que seja uma espécie nativa brasileira.

4.1.4 Cerejeira – *Amburana cearensis*

A cerejeira, *Amburana cearensis* (Allemão) A.C.Sm., pertence à família Fabaceae, sendo encontrada nos estados do Acre, Amazonas, Bahia, Ceará, Espírito Santo, Góias, Mato Grosso, Minas Gerais, Pará, Pernambuco, Rondônia, além da Argentina. É popularmente conhecida como amburana, amburana-de-cheiro, cerejeira-rajada, cumaré, cumaru-de-cheiro, emburana, imburana, imburanda-de-cheiro, louro-ingá, umburana (IPT, s.d.).

Sua madeira é caracterizada por cerne e alburno distintos pela cor, cerne castanho-amarelado-claro, às vezes com estrias mais escuras; cheiro característico e agradável; gosto adocicado; densidade média (0,60 g/cm³); alto teor de extrativos (27,04%); grã direita; textura média, aspecto fibroso atenuado (IPT, s.d.; ALMEIDA et al., 2015).

É considerada não durável, apresentando baixa resistência ao ataque de fungos; e moderadamente permeável a tratamentos preservativos. Apresenta fácil trabalhabilidade e secagem, além de boa estabilidade quando em uso. E, em razão de sua boa estabilidade e resistência mecânica entre baixa e média, pode ser utilizada para confecção de móveis de alta qualidade, lâminas decorativas, lambris, painéis, tanoaria, etc (IPT, s.d.; IPEF, s.d.).

4.2 Caracterização química da madeira

A madeira é um biopolímero tridimensional composto, principalmente, por celulose, hemiceluloses e lignina, que formam a parede celular e, em menor quantidade, por extrativos e compostos inorgânicos, os quais variam entre espécies, dentro de uma mesma espécie e de uma mesma árvore, justificando a diversidade das propriedades tecnológicas (LEPAGE et al., 1986; TRUGILHO et al., 1996; ROWELL et al., 2005).

Para Trugilho et al. (1997), é importante o conhecimento da composição química da madeira para utilizações técnicas e fins científicos, como em processos de polpação e branqueamento, produção de carvão, produção de estruturas de madeira e desenvolvimento de retardantes de fogo e preservantes para aumentar a durabilidade da madeira.

A celulose, cujo conteúdo varia entre 40 a 50% do peso seco da madeira, é composta por unidades de β - D - anidroglicopiranosose, ligadas entre si através de uma ligação glicosídica entre os carbonos 1 e 4, tornando-a uma estrutura de cadeia linear de alto peso molecular, organizada, parcialmente cristalina e insolúvel na maioria dos solventes, incluindo álcalis fortes (PETTERSEN, 1984; KLOCK et al., 2005).

Goring e Timell (1962) determinaram o grau de polimerização médio para celulosas nativas de várias fontes usando um procedimento de isolamento de nitração que minimizava a despolimerização e maximizava o rendimento. Essas determinações de peso molecular, feitas por experimentos de espalhamento de luz, indicam que a celulose de madeira tem um grau de polimerização de pelo menos 9.000 a 10.000 e possivelmente até 15.000. Um grau de polimerização de 10.000 significaria um comprimento linear da cadeia de aproximadamente 5 μ m em madeira (ROWELL et al., 2005).

Os agrupamentos de moléculas de celulose formam as microfibrilas, que originam as fibrilas e estas formam as fibras celulósicas. O diâmetro das microfibrilas de celulose varia de 2 a 20 nm, de acordo com a origem das amostras de celulose, com um comprimento atingindo várias dezenas de micrômetros e, em razão de seu alto grau de polimerização e orientação linear, contribuem para a resistência e a disposição estrutural da parede celular (WINANDY; ROWELL, 1984; KLOCK et al., 2005; TAIZ; ZEIGER, 2009; STEVANOVIC, 2016).

As hemiceluloses, ou polioses, são polissacarídeos de menor massa molar se comparados à celulose, que constituem entre 15 a 35% da madeira de folhosas e 20 a 32% das madeiras de coníferas, formados em proporções variadas por unidades dos seguintes

açúcares: xilose, manose, glucose, arabinose, galactose, ácido galactourônico, ácido glucourônico e ácido metilglucourônico (KLOCK et al., 2005; ROWELL, 2005; TAIZ; ZEIGER, 2009; KLOCK; ANDRADE, 2013; STEVANOVIC, 2016).

A maioria das hemiceluloses é encontrada nas regiões amorfas das cadeias de celulose e em estreita associação com a lignina, possivelmente sendo o material de conexão entre celulose e lignina (WINANDY; ROWELL, 1984). Estão ligadas à celulose através de ligações de hidrogênio e seus acoplamentos físicos tornam quase impossível separá-las, sem danos à celulose (COLODETTE, 2005).

Segundo Timell (1982), algumas hemiceluloses estão presentes em quantidades muito grandes quando a árvore está sob estresse, como por exemplo, a madeira de compressão que apresenta um conteúdo mais alto de D-galactose e de lignina.

Devido à ausência de cristalinidade, a sua baixa massa molecular e a sua configuração irregular e ramificada, as polioses absorvem água facilmente (KLOCK; ANDRADE, 2013). Além disso, são solúveis em álcalis e facilmente hidrolisadas por ácidos (ROWELL et al., 2005); contribuem para as propriedades estruturais da parede celular e também desempenham funções na regulação do crescimento e desenvolvimento das plantas (LIMA, 2002).

Segundo Klock e Andrade (2013), as ligninas têm origem a partir da polimerização dehidrogenativa (iniciada por enzimas) dos seguintes precursores primários: álcool trans-coniferílico, álcool trans-sinapílico e álcool para-trans-cumárico. Estão localizadas na lamela média composta, bem como na parede secundária; não ocorrem sozinhas na natureza, sendo impossível removê-las quantitativamente da estrutura da madeira sem considerável degradação; consideradas altamente complexas e formadas por unidades aromáticas de fenilpropano. Durante o desenvolvimento das células, as ligninas são incorporadas como o último componente na parede, interpenetrando as fibrilas e assim fortalecendo, enrijecendo as paredes celulares (KLOCK et al., 2005; ROWELL et al., 2005).

As ligninas também agem como barreiras hidrofóbicas que protegem as plantas do ataque biológico por vários sistemas enzimáticos, que são geralmente eficazes em soluções aquosas; ajudam no transporte de água vedando as paredes celulares das plantas contra perdas de água; além de auxiliar no suporte da copa (KLOCK; ANDRADE, 2013; STEVANOVIC, 2016).

Os extrativos incluem lipídios, compostos fenólicos, terpenóides, ácidos graxos, ácidos resínicos, ésteres de esteril, esterol e ceras; e constituem de 2 a 5% do peso seco da

madeira, podendo chegar a 15%. Estão localizados nas células do parênquima, nos canais secretores, na lamela média, nos espaços intercelulares e na parede celular, porém, não fazem parte dos componentes estruturais da parede celular (FENGEL; WEGENER, 1989; ROWELL et al.; 2005; SHEBANI et al., 2008).

Embora os extrativos contribuam com apenas uma pequena porcentagem da composição da madeira, eles têm influência significativa em suas propriedades, como resistência mecânica e a cor, além da qualidade da madeira ser afetada pela quantidade e pelo tipo de extrativo (SHEBANI et al., 2008).

A maioria dos extrativos de madeira são metabólitos secundários, que desempenham vários papéis nas árvores vivas não relacionados ao crescimento ou desenvolvimento celular, pelo qual os metabólitos primários são responsáveis. Metabólitos secundários protegem árvores vivas contra patógenos ou outros agentes biológicos, enquanto na madeira eles são frequentemente responsáveis pela durabilidade (STEVANOVIC, 2016).

O conteúdo de extrativos na madeira depende de fatores como a posição na árvore, tecido anatômico, taxa de crescimento da árvore, fatores genéticos, espécie, idade etc. (KLOCK; ANDRADE, 2013; STEVANOVIC, 2016). Em geral, as madeiras de coníferas têm um teor mais alto de extrativos do que madeiras de folhosas (ROWELL et al., 2005).

4.3 Biodeterioração da madeira

A biodeterioração de materiais lignocelulósicos, como a madeira, é um processo natural de reciclagem de matéria orgânica e o entendimento deste processo contribui para a compreensão do ciclo natural do carbono, que tem início na biossíntese dos seus constituintes a partir de H₂O, CO₂ e energia solar e termina com a mineralização destes constituintes e liberação de CO₂ e H₂O, em decorrência da decomposição causada principalmente por fungos (ARANTES; MILAGRES, 2009).

Biodeterioração pode ser definida como a destruição biológica indesejada ou qualquer mudança indesejada nas propriedades de um material não vivo causada por atividade de organismos vivos (ZABEL; MORRELL, 1992). Essa destruição e desintegração da madeira pode ocorrer de diversas maneiras, sendo importante a identificação da causa principal para que o problema possa ser combatido especificamente e com sucesso (MENDES; ALVES, 1988).

Materiais naturalmente biodegradáveis são amplamente utilizados em construções que estão expostas a processos de biodeterioração de origens químicas, ambientais ou biológicas. Porém, nenhuma madeira é capaz de resistir, indefinidamente, sob condições desfavoráveis. A taxa de deterioração do material é diretamente dependente do ambiente a que esse material será exposto, sendo que em climas tropicais e subtropicais, o intenso ataque de organismos xilófagos às superfícies externas é um problema constante por causa das altas temperaturas e umidades relativas (SOUZA; GAYLARDE, 2002; PAES et al., 2004; MATTOS et al., 2014).

Normalmente, em cada ambiente que a madeira é utilizada (nicho ecológico), ocorre uma combinação de organismos que podem atacá-la simultaneamente, ou seja, dificilmente ocorrem de forma isolada neste material (MORESCHI, 2013).

Os organismos xilófagos responsáveis pela biodeterioração da madeira dividem-se em dois grupos: fungos e bactérias, que liberam enzimas que provocam a quebra da estrutura da madeira; e insetos e perfuradores marinhos, que escavam a estrutura da madeira em busca de abrigo ou alimento (MENDES; ALVES, 1988).

Os fungos são responsáveis pela maior proporção de danos causados à madeira, pois ocorrem com maior frequência neste tipo de material (MORESCHI, 2013). Se instalam e se desenvolvem de forma seletiva na madeira, em função das variações e das combinações (interações) entre as condições ambientais e do substrato madeira.

As condições mais favoráveis englobam temperatura ótima entre 24 a 32 °C, podendo haver exceção para o desenvolvimento de fungos termofílicos entre 5 a 65° C; pH ótimo entre 4,5 a 5,5, sendo este intervalo coincidente com o pH da madeira da maioria das espécies florestais; teores de oxigênio de aproximadamente 1% já permitem o desenvolvimento de fungos e, quanto maior, até o teor de oxigênio normal na atmosfera, maior será a atividade destes microrganismos deterioradores; e teor de umidade acima de 20%, permitindo rápida difusão das enzimas produzidas pelos fungos (MORESCHI, 2013).

Os fungos pertencentes à classe dos Basidiomicetos destacam-se como os principais deterioradores. A degradação causada por estes fungos ocorre necessariamente de forma extracelular, uma vez que os componentes da madeira devem ser inicialmente despolimerizados até compostos menores que são susceptíveis ao transporte através da parede celular. Agem através da penetração de suas hifas pelo lúmen das células, as quais ali instaladas produzem uma variedade de metabólitos extracelulares que vão, assim, atuar metabolizando os componentes da parede celular vegetal (ARANTES; MILAGRES, 2009).

Para Zabel e Morrell (1992), a podridão e a descoloração são os dois tipos principais de biodeterioração. A podridão pode ser definida como a mudança nas propriedades físicas e químicas da madeira causada principalmente por atividades enzimáticas dos microrganismos. Enquanto que a descoloração é a mudança na cor natural da madeira resultante do crescimento de fungos, de mudanças químicas nas células ou no conteúdo das células.

Os estágios iniciais ou incipientes da deterioração são frequentemente acompanhados de uma descoloração da madeira. Já em estágios mais avançados, a madeira sofre alterações definitivas na cor e nas propriedades, sendo que estas alterações dependem do organismo e das substâncias que ele remove (CLAUSEN, 2010).

Nesse sentido, as preferências alimentares e as suas características enzimáticas próprias influenciam na classificação dos fungos em emboloradores, manchadores e apodrecedores.

A madeira embolorada caracteriza-se por uma formação pulverulenta em sua superfície, de coloração variada, porém facilmente removível por meio de raspagem. O ataque é aparentemente limitado à superfície, mas as hifas penetram no alburno em profundidade e se mantêm sem pigmentação, o que as diferencia dos fungos manchadores (SCHEFFER, 1973; MORESCHI, 2013).

Moreschi (2013) ainda destaca que a madeira atacada por fungos manchadores adquire coloração que a desvaloriza comercialmente para várias finalidades. Porém, em razão das alterações nas propriedades mecânicas não ocorrerem em níveis significativos, o dano é considerado como deterioração secundária da madeira.

Entre os fungos apodrecedores, dois tipos principais de podridão são reconhecidos: podridão branca e parda. Microscopicamente, os fungos de podridão parda removem a celulose e a hemicelulose, fazendo com que, macroscopicamente, a madeira adquira uma cor levemente queimada, em razão da permanência da lignina, além de aspecto quebradiço e rachaduras perpendiculares e paralela às fibras (CLAUSEN, 2010; MORESCHI, 2013).

Por sua vez, microscopicamente, os fungos de podridão branca atacam celulose, hemicelulose e lignina, provocando uma aparência de cor esbranquiçada e a perda de seu aspecto lustroso, além de linhas escuras demarcando o limite entre as regiões atacada e não atacada. Em ambos os tipos de podridão, ocorrem progressivas perda de massa e das propriedades de resistência, em razão da destruição dos elementos estruturais das paredes celulares, apesar de mais intensa na podridão parda (CLAUSEN, 2010; MORESCHI, 2013).

As enzimas envolvidas na degradação da celulose e das polioses são hidrolases que apresentam certa especificidade pelo respectivo substrato, e as enzimas responsáveis pela degradação da lignina são oxidases que, em geral, são pouco específicas. Os fungos de podridão branca produzem todas as enzimas extracelulares necessárias para a degradação da celulose (endo-1,4- β -glucanase, exo-1,4- β -glucanase e 1,4- β -glicosidase), enquanto que os fungos de podridão parda produzem endo-1,4- β -glucanase e 1,4- β -glicosidase, mas não a exo-1,4- β -glucanase (ENOKI et al., 1997; ARANTES; MILAGRES, 2009).

Já a degradação enzimática das polioses demanda um conjunto enzimático mais complexo, composto por uma série de enzimas hidrolíticas, sendo as principais endo-1,4- β -xilânase e β -xilosidase, e de enzimas acessórias, como α -glucuronidase, α -L-arabionofuranosidase, acetil esterase, mananases e galactanases, devido aos diferentes tipos de ligações e unidades monoméricas que estão presentes na sua estrutura de heteropolissacarídeo ramificado (ENOKI et al., 1997; ARANTES; MILAGRES, 2009).

A degradação da lignina, por sua vez, requer enzimas oxidativas, que são duas peroxidases, ligninaperoxidase (LiP) e peroxidase dependente de manganês (MnP), e uma oxidase, a lacase (ENOKI et al., 1997; ARANTES; MILAGRES, 2009).

Além dos fungos, outros organismos causam danos à madeira como os cupins, pertencentes à ordem Isoptera, que são considerados importantes deterioradores de madeira e nutrem-se basicamente da celulose, sendo que a digestão deste polissacarídeo é feita com auxílio de um grupo de protozoários presentes em seu trato digestivo. Normalmente atacam a madeira pelo caminho mais fácil, deteriorando primeiro o lenho mais mole da madeira e em seguida o mais duro. Ademais, são adaptados a diferentes condições de deterioração da madeira, sendo conhecidos como cupins de solo ou subterrâneos (Família Rhinotermitidae) e cupins de madeira seca (Família Kalotermitidae) (MORESCHI, 2013).

Os cupins de solo ou subterrâneos são mais frequentes em solos úmidos e arenosos, e regiões quentes. A presença de cupins na madeira é indicada pela existência de pequenos pelotas (excrementos) que eles empurram para fora do material atacado. No interior da madeira, a presença de galerias sem obedecer o sentido das fibras é outra indicação deste agente biológico e, especificamente para o caso dos cupins subterrâneos, podem também ser observados dutos construídos por estes indivíduos, ligando o solo à madeira, utilizados para a condução e proteção destes indivíduos do solo à madeira, e também para o transporte de umidade do solo ao material atacado (MORESCHI, 2013).

O grau de suscetibilidade ao ataque de organismos xilófagos é uma das principais propriedades das madeiras, sendo que um alto grau de nobreza é conferido às madeiras com

elevada durabilidade natural, amplo espectro de utilização e maior valor de mercado (OLIVEIRA et al., 2005).

Nesse sentido, um aumento da vida útil da estrutura é extremamente desejado, e pode ser alcançado por meio da incorporação de biocidas ao verniz (SOUZA; GAYLARDE, 2002), aplicação de produto químico preservativo (COSTA et al., 2005; TELES, 2014) ou óleos essenciais (MEDEIROS et al., 2016).

4.4 Preservação da madeira

A preservação de madeiras é todo e qualquer procedimento ou conjunto de medidas que possam conferir à madeira em uso maior resistência aos agentes de deterioração, visando obter a extensão da vida útil da madeira em serviço (JANKOWSKY et al., 2002; MORESCHI, 2013).

Por sua vez, preservante é a denominação dada a certas substâncias químicas que, quando aplicadas à madeira, lhe conferem proteção contra a ação de organismos xilófagos (SANTINI, 1988).

A indústria de preservação da madeira vem se desenvolvendo desde o começo do século XVIII, e durante este período foram descobertas numerosas substâncias tóxicas utilizáveis, de acordo com os diferentes agentes biodeterioradores. Os produtos preservantes variam em natureza, eficácia e custo; devendo ser levado em consideração o uso final da madeira a ser preservada, a vida útil requerida e os aspectos econômicos do tratamento (VÁSQUEZ; RECABARREN, 2005).

Outro aspecto importante diz respeito aos requisitos que devem ser atendidos pelos produtos preservantes de madeira, tais como ser tóxico aos agentes biodeterioradores; não ser tóxico ao homem, animais e organismos não xilófagos; ter ação duradoura; ser quimicamente estável; não alterar as características da madeira ou de outro material em contato; ter boa penetração e difusão uniforme; não aumentar a inflamabilidade; ser de fácil aquisição; e ter preço acessível. Entretanto, um preservante que apresente todas estas características dificilmente será encontrado no mercado, voltando ao ponto da escolha em função da dependência da situação de utilização da madeira (SANTINI, 1988).

O tratamento preservativo é imprescindível para madeiras de baixa durabilidade natural ou para porções permeáveis e passíveis de tratamento, como o alburno, contribuindo para o aumento da vida útil dessas madeiras, reduzindo assim os custos de substituição e

permitindo uma utilização mais eficiente dos recursos florestais (LEBOW, 2010; VIDAL et al., 2015).

Dentre os diversos processos utilizados com o objetivo de adequar a madeira a usos diversos, são considerados mais eficientes os tratamentos realizados sob pressão, pois proporcionam uma distribuição e penetração mais uniforme do produto preservativo em todas partes permeáveis da madeira, além de apresentar maior resistência à lixiviação e melhor desempenho no campo (LEPAGE et al., 1986; BRAZOLIN et al., 2004; TELES et al., 2016).

Os processos sem pressão, ou superficiais, caracterizam-se por não utilizarem pressão externa para forçar a penetração do produto químico na madeira, portanto, proporcionam baixa retenção e penetração do produto preservativo na madeira. A impregnação é baseada nos princípios da difusão e/ ou da capilaridade, os quais proporcionam uma penetração do preservativo quase que superficial, na maioria das vezes. Como efeito, conferem à madeira uma proteção limitada contra os organismos xilófagos, sendo recomendados para a preservação de peças que estarão sujeitas a baixos riscos de deterioração biológica (BRAZOLIN et al., 2004).

Os principais parâmetros de qualidade de um preservante são a penetração e a retenção, garantidos pelos níveis mínimos recomendados pelas normas técnicas. A penetração é definida como a profundidade alcançada pelo produto químico ou pelos seus ingredientes ativos na madeira, expressa em milímetros (mm). Já a retenção é a quantidade do produto químico ou dos seus ingredientes ativos, contida de maneira uniforme num determinado volume da madeira, expressa em quilogramas de ingrediente ativo por metro cúbico de madeira tratável (kg/m^3) (BRAZOLIN et al., 2004).

Moreschi (2013) destaca que os preservantes podem ser classificados pela sua natureza físico-química como oleosos, como creosoto, naftenato de cobre e quinolinato de cobre-8; oleossolúveis, aqueles que são dissolvidos em algum tipo de solvente orgânico, como pentaclorofenol e tribromofenol; e hidrossolúveis, aqueles que são dissolvidos em água, como arseniato de cobre cromatado (CCA), CCB (composto de cobre, cromo e boro) e tribromofenato de sódio (TBP-Na).

O arseniato de cobre cromatado (CCA) é atualmente um dos produtos químicos mais eficientes para o tratamento da madeira, protegendo-a da podridão por fungos e da deterioração por insetos e xilófagos marinhos. É indicado, assim como o creosoto, para situações de alto risco ou exposição, com vida útil de 30 anos ou mais (EATON; HALE, 1993; VALLE et al., 2013).

No Brasil, o CCA, sob pressão, é muito utilizado no tratamento industrial de moirões, postes de eletrificação e dormentes para ferrovias, não apresentando nenhuma restrição quanto ao seu uso, como já acontece em alguns países da Europa e nos Estados Unidos (VALLE et al., 2013). O uso concentrado nesses produtos, segundo Jankowsky et al. (2002), é decorrente da falta de conhecimento e tradição no uso de madeira preservada, além da falta de especificações técnicas.

Silva (2007) destaca que o CCA mantém inalterada a condutividade elétrica da madeira, não altera a combustibilidade da madeira, não aumenta a corrosividade a metais utilizados em contato, não exala vapores e odores, proporciona maior durabilidade aos acabamentos de superfície, além de ser quimicamente estável em temperatura ambiente.

Vásquez e Recabarren (2005) citam que a norma P5-83 da AWWA (American Wood Protection Association) reconhece três tipos de CCA, em razão das diferentes concentrações dos sais em sua formulação. Entretanto, Teles (2014) ressalta que o tipo C (47,5% de cromo - CrO_3 ; 18,5% de cobre - CuO ; e 34% de arsênio - As_2O_5) é o mais utilizado devido a sua maior resistência à lixiviação e melhor desempenho em campo. Esta mistura de sais combina o efeito fungicida do cobre, com o inseticida do arsênio, adicionando ainda o cromo com o objetivo de obter alta fixação dos princípios ativos.

As reações instantâneas iniciais do CCA com a madeira resultam num rápido decréscimo de pH, cuja magnitude depende da concentração da solução de tratamento. Essa queda é atribuída à fixação do cobre por troca iônica com liberação de prótons. Em seguida, o pH aumenta gradativamente à medida que as reações de fixação progridem, em razão da formação de complexos lignina-ácido crômico e lignina-cromato de cobre, além da redução do cromo (LEPAGE, 1986).

Quando o CCA é aplicado na madeira, o cromo provoca a reação de precipitação de grande quantidade de cobre e arsênio e reage com a madeira, tornando os produtos praticamente insolúveis. A reação de fixação desencadeada pelo cromo deixa o arsênio e o cobre totalmente aderidos às estruturas celulares (SILVA, 2007).

Lepage (1986) afirma que a maior parte do cobre fixado na madeira está localizado na camada S1 da parede celular, indicando que este componente está associado à lignina ali presente. Porém, o cobre também está associado à celulose, provavelmente ligado aos grupos hidroxilas (-OH). O cromo forma complexos nas formas trivalentes e hexavalentes, sendo estas provavelmente com as unidades guaiacil da lignina. Já em sua forma trivalente, o cromo reage com o arsênio formando CrAsO_4 , além de conferir repelência à água, um dos fatores de alta eficiência do CCA. Na madeira tratada, cerca de 85% do arsênio reage com o cromo;

e o restante forma complexos relativamente solúveis com a lignina e a celulose. Para Galvão et al. (2004), o cromo é considerado o principal responsável pela fixação do arsênio e do cobre.

Apesar de todos os aspectos positivos do CCA já mencionados, Richardson (1978) apresenta duas importantes desvantagens. Quando a espécie de madeira apresenta baixa permeabilidade e baixa durabilidade natural, como o eucalipto, o CCA tem sua eficiência reduzida em razão da incapacidade de penetração profunda na madeira, influenciando diretamente na lixiviação. Além disso, mesmo que uma madeira apresente altos níveis de retenção, pode ocorrer uma distribuição irregular do produto, não a protegendo totalmente, deixando-a suscetível à deterioração.

As reações que ocorrem na madeira durante a fixação do CCA têm uma grande influência nos tipos de metais lixiviados e, conseqüentemente, em sua toxicidade. O CCA é classificado pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) como extremamente tóxico classe I, e pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) como de alto risco ambiental classe I, autorizado exclusivamente para uso industrial pelo método de autoclavagem (tratamento sob pressão). É indicado para combate a insetos xilófagos, fungos de apodrecimento e furadores marinhos (IBAMA, 2019).

4.5 Durabilidade natural da madeira

Segundo Eaton e Hale (1993), a durabilidade natural reflete a resistência da madeira a fatores deteriorantes, como fungos, insetos, brocas marinhas e intemperismo. Porém, Oliveira et al. (2005) afirmam que nenhuma espécie de madeira, nem mesmo aquelas de reconhecida durabilidade natural, são capazes de resistir, indefinidamente, às intempéries, às variações das condições ambientais, ao ataque de microrganismos e à ação do próprio homem.

A madeira pode apresentar alta, média ou baixa resistência à ação desses agentes deterioradores, sendo o cerne considerado a parte mais durável, porém, podem ocorrer variações entre espécies, entre árvores com idades diferentes e até dentro de uma mesma árvore (GOMES; FERREIRA, 2002).

A durabilidade natural da madeira é relacionada principalmente à presença de extrativos tóxicos depositados no cerne, tais como taninos e outras substâncias fenólicas complexas, os quais geralmente são tóxicos aos fungos e repelem insetos. Em muitas

espécies, o cerne interno apresenta menor durabilidade que o cerne externo; o cerne externo é menos durável da base da árvore para cima, enquanto o oposto ocorre com o cerne interno. Na base da árvore, essas diferenças são mais extremas e quanto maior a árvore, maiores são as diferenças na base; mas no geral a resistência natural é menor no sentido casca-medula. Acredita-se que essa redução ocorre em razão de desintoxicação biológica, da oxidação natural de extrativos de cerne ou da polimerização contínua de extrativos para produzir compostos menos tóxicos (ZABEL; MORREL, 1992; EATON; HALE, 1993).

No caso de peças de madeira preservadas, além das condições ambientais de exposição e das características intrínsecas à madeira, também devem ser levados em consideração os seguintes fatores: a toxidez do preservante; a tratabilidade da madeira; a quantidade de preservante absorvida ou nível de retenção; a macrodistribuição do preservante, isto é, a profundidade de penetração na madeira; a microdistribuição do preservante, ou seja, se penetrou na parede celular ou ficou depositado apenas no lumen; a afinidade química entre o preservante e a madeira; e características inerentes ao próprio preservante, tais como estabilidade química, lixiviabilidade, volatilidade, resistência à detoxificação microbiológica, dentre outros. Todos estes fatores apresentam um alto grau de interdependência e, de acordo com as circunstâncias, um ou outro fator pode ser limitante (LOPEZ; MILANO, 1986).

O conhecimento da resistência natural da madeira influencia diretamente na recomendação de seu emprego mais adequado, evitando-se com isso, gastos desnecessários com a reposição de peças, e reduzindo os impactos sobre as florestas remanescentes. Entretanto, para definição do grau de resistência natural da madeira devem ser realizados ensaios, dependendo do propósito, tais como ensaios em laboratório ou ensaios de campo (PAES et al., 2004; RIBEIRO et al., 2014).

Ensaio em laboratório envolvem o controle de condições biológicas e ambientais, tornando-as o mais favorável possível para o pleno desenvolvimento dos organismos xilófagos. Geralmente são testes acelerados, com duração bem inferior aos testes de campo, onde corpos de prova, provenientes do cerne, são submetidos a fungos xilófagos ou térmitas, seguindo normas específicas.

Ensaio em campo consistem no soterramento parcial de amostras de madeira preservadas ou não, com sucessivas inspeções periódicas, objetivando avaliar o seu estado de sanidade sob condições reais de lixiviação, secagem, exposição à luz solar, além dos agentes químicos presentes no solo e microrganismos xilófagos. Após um determinado período de tempo, em geral anos, a vida útil da madeira em serviço pode ser determinada.

Um teste mais completo do preservante pode ser realizado em condições reais de serviço, utilizando por exemplo postes tratados já contendo perfurações, cruzetas e outros acessórios indispensáveis (SANTINI, 1988; COSTA et al., 2005).

4.6 Avaliações não destrutivas

Para Ross (2015), a avaliação não destrutiva é a ciência de identificação das propriedades físicas e mecânicas de um determinado material sem alterar suas capacidades de usos finais, por meio de tecnologias não destrutivas que fornecem dados precisos referentes às propriedades, ao desempenho ou à condição do material analisado

A necessidade de fornecer metodologias de avaliação de materiais e produtos de madeira para uma definição mais precisa acerca do uso apropriado foi a motivação primária para o desenvolvimento de pesquisas no campo de ensaios e avaliações não destrutivas. Pesquisas estão sendo desenvolvidas em todo o mundo com o objetivo de explorar o uso potencial de uma ampla gama de tecnologias não destrutivas para avaliação da madeira e materiais de madeira, desde a árvore em pé até estruturas em serviço (ROSS, 2015).

As vantagens que os métodos não destrutivos apresentam sobre os métodos tradicionais são: a possibilidade de utilização posterior da peça testada; a aplicação mesmo quando a peça está em utilização estrutural; a rapidez de aplicação do método; a confiabilidade dos valores apresentados; redução das perdas de material; classificação de peças em classes de qualidade e resistência, contribuindo todos esses fatores para uma economia financeira e de matéria-prima (PUEHRINGER, 2002; OLIVEIRA, 2005).

Todo método não destrutivo usa alguma forma de propagação de energia através ou em volta de um material para deduzir alguma característica importante do material examinado. Esta energia pode resultar de cargas estáticas ou dinâmicas ou ser gerada por ondas eletromagnéticas ou elásticas (SCHAD et al., 1996).

Estudos têm sido conduzidos no Brasil utilizando técnicas não destrutivas em peças e estruturas de madeiras, tais como o ultrassom, ondas de tensão, espectroscopia no infravermelho próximo e médio e fluorescência molecular, os quais têm apresentado resultados satisfatórios, porém ainda requerem um maior nível de aprofundamento e conhecimento das técnicas (COSTA, 2009; STANGERLIN et al., 2010; SOUZA et al., 2011; TELES, 2014; OLIVEIRA et al.; 2015).

4.6.1 Ultrassom

Em materiais homogêneos e isotrópicos, a avaliação não destrutiva permite detectar falhas surgidas em processos de fabricação. Na madeira, essas irregularidades ocorrem naturalmente, e a sua influência sobre as propriedades mecânicas pode ser avaliada de forma não destrutiva (CANDIAN; SALES, 2009).

Apesar da técnica de ultrassom estar sendo utilizada desde a década de 70 na avaliação não destrutiva de diferentes materiais, somente mais recentemente essa técnica passou a ser empregada sistematicamente em produtos à base de madeira. Esse relativo atraso, deve-se às peculiaridades anatômicas desse material, as quais dificultam a compreensão do fenômeno de propagação das ondas quando comparadas com outros materiais homogêneos (PUCCINI, 2002).

A técnica de avaliação da madeira por ultrassom é considerada uma ferramenta importante, com potencial para melhorar a qualidade e a competitividade desse material, devido à facilidade de operação e ao custo relativamente baixo na aquisição e operacionalização do equipamento, quando comparado aos equipamentos utilizados em ensaios destrutivos, além de poder ser utilizada tanto na árvore em pé quanto em peças menores (STANGERLIN et al., 2010).

A avaliação não destrutiva por ondas ultrassônicas consiste na emissão de pulsos elétricos por um circuito eletrônico, que são conduzidos por cabos coaxiais, sendo convertidos em ondas elásticas pelo cristal piezoeletrico, localizado nos transdutores. Ao atingir o material, o sinal emitido pelo gerador é atenuado e, logo em seguida, é recuperado por outro cristal piezoeletrico, onde as vibrações são amplificadas e novamente transformadas em pulsos elétricos para medir o tempo de propagação (CALEGARI, 2006; BUCUR, 2006; MANTOVANI, 2014).

A velocidade é calculada a partir da distância entre os transdutores e tempo percorrido pela onda ultrassônica, que é indicado pelo equipamento de ultrassom. Para esse cálculo, admite-se que o percurso da onda é retilíneo. Além disso, é desejável que o tamanho da face da amostra em contato com o transdutor seja maior do que o diâmetro do transdutor, visando reduzir os efeitos de borda (CALEGARI, 2006; BUCUR, 2006; MANTOVANI, 2014).

Os transdutores possuem diversos tipos, tamanhos e frequências, sendo mais utilizados os de face plana, que necessitam do uso de acoplantes (gel, óleo graxa, vaselina), os quais devem ser aplicados entre a superfície da peça analisada e o transdutor, visando reduzir erros, visto que a presença de ar entre esses meios ocasiona maior tempo para propagação da onda

no material e, conseqüentemente, redução da velocidade. Podem ser posicionados de forma direta, acoplados em faces opostas; semidireta, acoplados em faces adjacentes; e indireta, acoplados na mesma face (Figura 1) (NESVIJSKI, 2000; TELES, 2014).

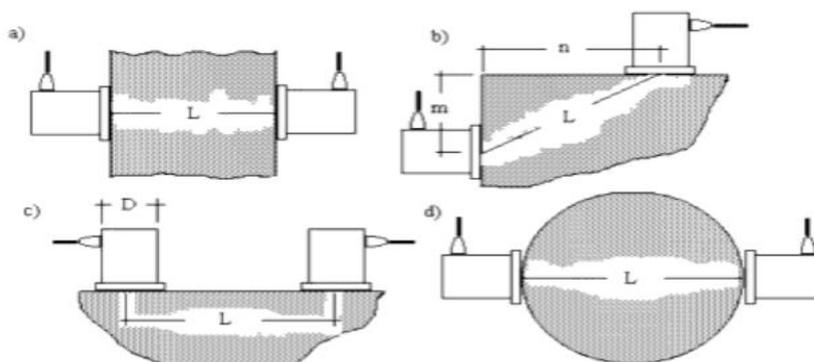


Figura 1. Esquemas de acoplamento de transdutores: (a) direta, (b) semidireta, (c) indireta e (d) superfície curva.

As ondas ultrassônicas têm frequências de 20 kHz e superiores, e a sua velocidade de propagação está intimamente relacionada com as propriedades elásticas dos materiais sólidos, sendo função da raiz quadrada da razão entre o módulo de elasticidade dinâmico e a massa específica desse material (ZOMBORI, 2001; CALEGARI et al., 2008; MANTOVANI, 2014).

Especificamente para madeira, o intervalo de frequência utilizado está entre 20 kHz e 500 kHz), devido à elevada dissipação do sinal neste material. Essa perda de intensidade do sinal atua como um dos limitadores na utilização desse método em estruturas de madeira, principalmente as de elementos de maior dimensão (ZOMBORI, 2001; CALEGARI et al., 2008; MANTOVANI, 2014).

A aplicação do ultrassom se enquadra em duas categorias: alta frequência (baixa intensidade) e baixa frequência (alta intensidade). A aplicação de baixa intensidade tem o objetivo de simplesmente transmitir energia através do meio, a fim de obter informações sobre o meio ou transmitir informações através do meio. Ao contrário, a aplicação de alta intensidade afeta intencionalmente o meio de propagação ou seu conteúdo. Assim, a aplicação de baixa intensidade e alta intensidade de ondas ultrassônicas são consideradas técnicas de caracterização não destrutivas e destrutivas, respectivamente (PANDEY, 2010).

Esta técnica não-destrutiva vem sendo utilizada para diversas finalidades, tais como a determinação da existência de nós, presença de ataque de microrganismos ou insetos, direcionamento das fibras, deterioração, avaliação de elementos estruturais de madeira em uso, estimativa de propriedades físicas e mecânicas, controle do processo de secagem,

avaliação do efeito de tratamento preservativo e da qualidade do desdobro (GORNIAK; MATOS, 2000).

Em madeira sólida, as velocidades ultrassônicas típicas são de 1000 a 2000 m/s no sentido perpendicular às fibras e 5000 a 6000 m/s no sentido paralelo às fibras. A velocidade na direção radial é cerca de 50% maior do que na tangencial. Em lâminas de madeira, as ondas de flexão também estão presentes, com velocidades de aproximadamente 1500 m/s no sentido longitudinal e cerca de 50% inferior transversalmente. A maioria dos painéis de madeira apresentam velocidades em todas as direções semelhantes à madeira sólida no sentido perpendicular às fibras (BEALL, 2002).

Em razão da heterogeneidade da madeira, a propagação das ondas ultrassônicas é influenciada pelas propriedades anatômicas, físicas, morfológicas, presença de defeitos, biodeterioração, geometria das amostras, condições do meio, além da frequência e do tipo de transdutor (GATTO et al., 2012).

Gatto et al. (2012) ressaltam ainda que a avaliação não destrutiva por meio de ondas ultrassônicas pode ser utilizada para avaliações periódicas relativas à qualidade da madeira, principalmente dos defeitos produzidos pela ação do tempo e por agentes xilófagos. A madeira biodeteriorada perde a compactação do material celulósico tornando-se menos elástica que a madeira sã e, além disso, a onda terá que contornar espaços vazios resultantes da ação de agentes xilófagos, levando mais tempo para ir do ponto de emissão ao ponto de recepção. Logo, uma baixa velocidade de transmissão poderá indicar a ocorrência de defeitos na madeira inspecionada.

De acordo com Oliveira e Sales (2005), há forte relação entre a velocidade de propagação de ondas e a umidade. A velocidade de propagação diminui drasticamente com o aumento da umidade até o ponto de saturação das fibras, sendo que, a partir deste ponto, a variação da velocidade torna-se pequena. A atenuação é praticamente constante em baixos valores de umidade, mas aumenta a partir de um ponto crítico no qual as paredes das células começam a reter água higroscópica ou de adesão, resultando numa diminuição da velocidade nas direções longitudinal, radial e tangencial. Portanto, o valor máximo de velocidade e o valor mínimo de atenuação são obtidos para a madeira seca.

O efeito da densidade nas ondas ultrassônicas depende da espécie analisada, da estrutura da madeira e da direção da medição. De modo geral, para um teor de umidade constante ao longo da amostra, o aumento da densidade propicia maior velocidade de propagação em qualquer das três direções da madeira (OLIVEIRA; SALES, 2005).

No entanto, mesmo com baixa densidade, a velocidade de propagação ultrassônica em coníferas é maior devido ao comprimento dos traqueídes (3,0 mm). Além disso, quanto maior a espessura da parede celular, maior o caminho contínuo para a propagação das ondas. Ou seja, em madeiras porosas, compostas por elementos anatômicos com diâmetros de lume acentuados, os espaços vazios tornam-se barreiras para a propagação, o que resulta na diminuição da velocidade das ondas ultrassônicas (TELES, 2002; OLIVEIRA; SALES, 2005; SHIMOYAMA, 2005).

Na direção longitudinal às fibras, são observadas as maiores velocidades de propagação, uma vez que as ondas encontram a estrutura contínua do material. A segunda maior velocidade ocorre na direção radial, em razão da estrutura contínua dos raios. A menor velocidade de propagação é sempre a tangencial, onde as ondas se propagam através de diferentes fases (TELES, 2002; OLIVEIRA; SALES, 2005; SHIMOYAMA, 2005).

4.6.2 Espectroscopia de infravermelho

As interações da radiação com a matéria são o objeto de estudo da ciência da espectroscopia, cujos métodos de análise são baseados na medida da quantidade de radiação produzida ou absorvida pelas moléculas de interesse. Os métodos espectroquímicos têm provido ferramentas amplamente empregadas para a elucidação de estruturas moleculares, bem como na determinação qualitativa e quantitativa de compostos orgânicos e inorgânicos (SKOOG et al., 2018).

Quase todos os compostos que tenham ligações covalentes absorvem várias frequências de radiação eletromagnética na região do infravermelho do espectro eletromagnético. Essa região envolve comprimentos de onda maiores do que aqueles associados à luz visível, que vão de aproximadamente 400 a 800 nm ($1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$), porém menores do que aqueles associados a micro-ondas, que são maiores que 1mm, correspondendo à faixa de radiação com números de onda no intervalo de aproximadamente 12.800 cm^{-1} a 10 cm^{-1} ou comprimentos de onda de $0,78\text{ }\mu\text{m}$ a $1.000\text{ }\mu\text{m}$ (Figura 2) (PAVIA et al., 2015).

Entretanto, este intervalo é convenientemente dividido em infravermelho próximo (NIR, do inglês, *Near Infrared Region*), com número de onda no intervalo de 12.800 cm^{-1} a 4.000 cm^{-1} (comprimento de onda no intervalo de $0,78\text{ }\mu\text{m}$ a $2,5\text{ }\mu\text{m}$), infravermelho médio (MIR, do inglês, *Medium Infrared Region*), 4.000 cm^{-1} a 200 cm^{-1} ($2,5\text{ }\mu\text{m}$ a $50\text{ }\mu\text{m}$), e

infravermelho distante (FIR, do inglês, *Far Infrared Region*), 200 cm^{-1} a 10 cm^{-1} ($50\text{ }\mu\text{m}$ a $1000\text{ }\mu\text{m}$) (HOLLER et al., 2009).

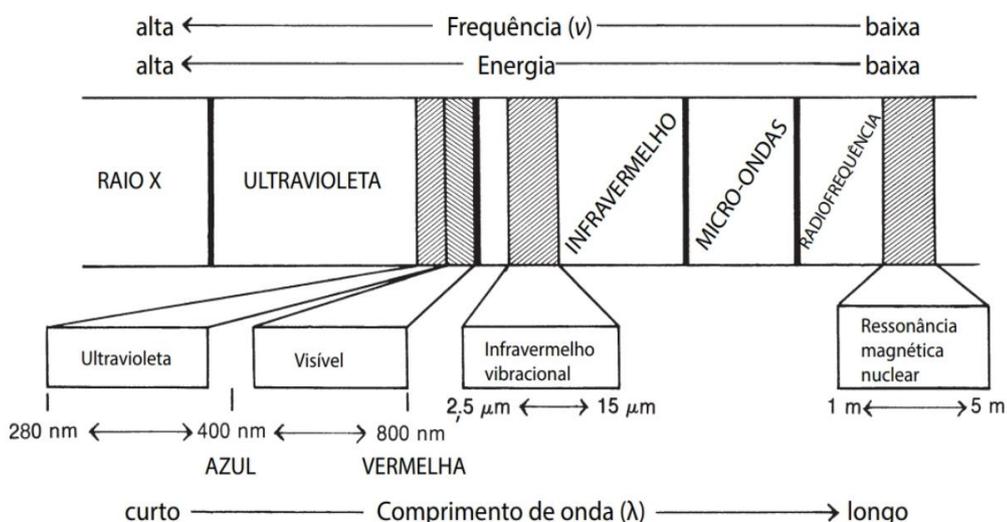


Figura 2. Relação do infravermelho vibracional com outros tipos de radiação (PAVIA et al., 2015).

A radiação no infravermelho geralmente não é suficientemente energética para causar transições eletrônicas, porém pode induzir transições nos estados vibracionais e rotacionais associados com o estado eletrônico fundamental da molécula (SKOOG et al., 2018).

Para absorver a radiação infravermelha, uma molécula deve sofrer uma variação no momento dipolo durante seu movimento rotacional ou vibracional. Apenas sob estas circunstâncias, o campo elétrico alternado da radiação pode interagir com a molécula e causar variações na amplitude de um de seus movimentos. Se a frequência da radiação é exatamente igual a uma frequência de vibração natural da molécula, ocorre absorção de radiação, causando uma variação na amplitude da vibração molecular. Não ocorre variação no momento dipolo durante a vibração ou rotação de espécies homonucleares, tais como O_2 , N_2 ou Cl_2 . Como consequência, estes compostos não podem absorver radiação infravermelha (HOLLER et al., 2009).

A espectroscopia é uma técnica instrumental analítica baseada nas propriedades de absorção e emissão de energia eletromagnética das moléculas em regiões do espectro eletromagnético. A resposta obtida após a exposição da amostra à radiação eletromagnética na região de comprimento de onda entre $0,78\text{ }\mu\text{m}$ a $2,5\text{ }\mu\text{m}$ (infravermelho próximo) é um

sinal (espectro) interpretado por técnicas estatísticas de análises multivariadas dos dados. Dados de análises laboratoriais convencionais são correlacionados com os espectros de infravermelho próximo por meio de modelo estatístico previamente construído a fim de prever várias propriedades da madeira (SANTOS et al., 2009; MUÑIZ et al., 2012).

Um espectrômetro de infravermelho determina as posições e intensidades relativas de todas as absorções, ou picos, na região do infravermelho e os registra graficamente. Esse gráfico de absorção *versus* número de onda (ou comprimento de onda) é chamado espectro infravermelho do composto. As mudanças no espectro em razão de mudanças na composição química podem ser quantificadas e são de utilidade técnica (POPE, 1995; PAVIA et al., 2015).

Como cada tipo de ligação tem sua própria frequência natural de vibração, e como dois tipos idênticos de ligações em dois diferentes compostos estão em dois ambientes levemente diferentes, os padrões de absorção no infravermelho, ou espectro infravermelho, em duas moléculas de estruturas diferentes nunca são exatamente idênticos. Dessa forma, o espectro infravermelho pode servir para moléculas da mesma forma que impressões digitais servem para seres humanos, de modo a comparar espectros de infravermelho de duas amostras que se acredita serem idênticas, para descobrir se de fato são (PAVIA et al., 2015).

Outro uso do espectro infravermelho é fornecer a informação estrutural de uma molécula. As absorções de cada tipo de ligação (N-H, C-H, O-H, C-X, C=O, C-O, C-C, C=C, C≡C, C N, entre outros) são, em geral, encontradas apenas em certas pequenas regiões do infravermelho vibracional. Uma pequena faixa de absorção pode ser definida para cada tipo de ligação, ou seja, fora dessa faixa, as absorções normalmente se devem a algum outro tipo de ligação. Por exemplo, uma absorção na faixa $1715 \pm 100 \text{ cm}^{-1}$ normalmente se deve à presença da ligação C=O (grupo carbonila) na molécula (Figura 3) (PAVIA et al., 2015).

Para Skoog et al. (2009), as bandas de absorção úteis para a identificação de grupos funcionais estão localizadas na região do infravermelho de comprimentos de onda mais curtos (de cerca de 2,5 μm a 8,5 μm). Porém, pequenas diferenças na estrutura e na constituição de uma molécula resultam em alterações significativas na distribuição dos máximos de absorção do espectro que se estende de aproximadamente 8 μm a 14 μm , denominada região de impressão digital. Deste modo, é uma região bastante apropriada para identificar compostos com base em comparações espectrais (HOLLER et al., 2009).

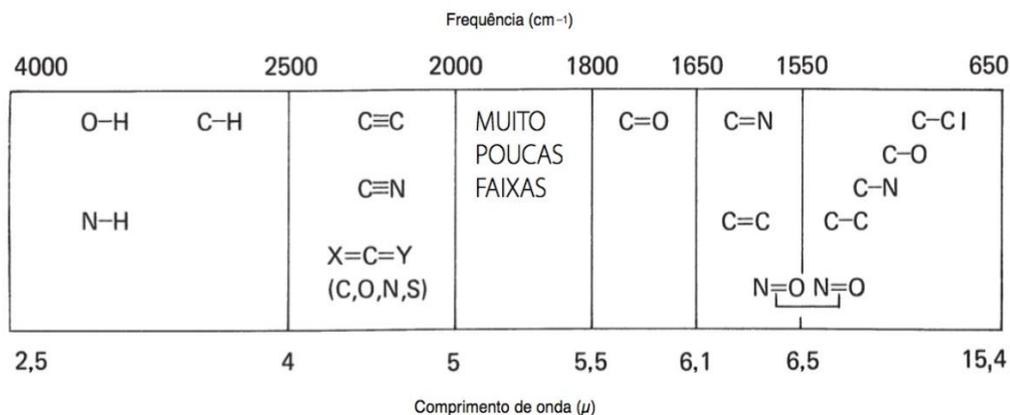


Figura 3. Regiões aproximadas de absorção das moléculas (PAVIA et al., 2015).

Apesar do trabalho de Coblenz, iniciado em 1900, ter proporcionado ampla aceitação da radiação no infravermelho médio, uma vez que foi o primeiro pesquisador a obter espectros de absorbância de substâncias puras e verificar sua utilidade para a identificação de grupos funcionais orgânicos; a região no infravermelho próximo, tem recebido recentemente muita atenção, em particular com relação a análises quantitativas de amostras com matrizes complexas (PASQUINI, 2003; BARBOSA, 2013).

Pasquini (2003) e Muñiz et al. (2012) destacam algumas vantagens desta técnica não destrutiva em relação às tradicionais, uma vez que é rápida, não invasiva, adequada para uso em linha de produção, exige preparo mínimo da amostra, possui instrumental simples e pode ser aplicada em qualquer material que contenha em suas moléculas, principalmente, ligações C-H, O-H, N-H, S-H.

Por outro lado, as variações presentes nos espectros são atribuídas à característica anisotrópica da madeira, devido à posição do plano de corte da madeira em relação ao feixe incidente de radiação infravermelha. Além disso, existem as variações relativas aos sinais de ruído, causados por falhas de leitura, sujeira nas amostras ou erro no processo de corte, reforçando a necessidade de uma calibração robusta (OLIVEIRA et al., 2015).

Para Souza et al. (2011), a acurácia de um modelo estatístico para prever as características tecnológicas da madeira por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) depende, fundamentalmente, das amostras usadas para geração do modelo e da qualidade das análises laboratoriais utilizadas para a caracterização da mesma.

Na área florestal, estudos utilizando a espectroscopia no infravermelho próximo demonstraram a eficácia da técnica para predição da qualidade da madeira e polpa celulósica, teor de componentes químicos (holocelulose, lignina, extrativos), monitoramento de

deterioração fúngica, propriedades físico-mecânicas, propriedades anatômicas e discriminação de espécies similares de madeira (MAGALHÃES et al., 2005; SANTOS et al., 2009; HEIN et al., 2010; ANDRADE et al., 2011; SOUZA et al., 2011; PASTORE et al., 2011; BRAGA et al., 2011; BASTOS et al., 2012; MILAGRES et al., 2013; SANDAK et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2015; LAZZAROTTO et al., 2016; NASCIMENTO et al., 2017; SOARES et al., 2017).

Sandak et al., (2013) monitoraram os efeitos da biodeterioração na madeira de abeto da Noruega, provocada por fungos de podridão branca e parda, através de espectroscopia no infravermelho próximo; e concluíram que esta técnica tem um grande potencial para avaliação da deterioração fúngica em campo.

Para mais, Pecoraro et al. (2015) avaliaram a deterioração da madeira por agentes biológicos, como as bactérias, quando preservada por longos períodos em condições alagadas. Para isso, utilizaram a espectroscopia no infravermelho próximo juntamente com regressão por mínimos quadrados parciais (PLSR, do inglês *Partial Least Squares Regression*), e observaram que a técnica é eficaz e confiável para estimar a composição química residual (em termos de holocelulose e lignina) de madeira biodeteriorada.

4.7 Redes neurais artificiais

As redes neurais artificiais estão inseridas dentro da área conhecida como sistemas inteligentes ou inteligência computacional e são modelos computacionais inspirados na neurobiologia, cujo objetivo é representar a cognição humana ou o neurônio biológico de forma generalizada (OLIVEIRA et al., 2015; MIGUEL et al., 2016).

Baseiam-se no funcionamento do sistema nervoso humano, formado por neurônios, os quais são células nervosas extremamente especializadas. Estas células possuem extensões, conhecidas como dendritos e axônios. Os dendritos são responsáveis por receberem os impulsos nervosos e conduzi-los até o corpo celular, que processa o estímulo para novamente distribuir (ou não) o sinal através de seu axônio para os dendritos de neurônios adjacentes (Figura 4) (CASTRO, 2011).

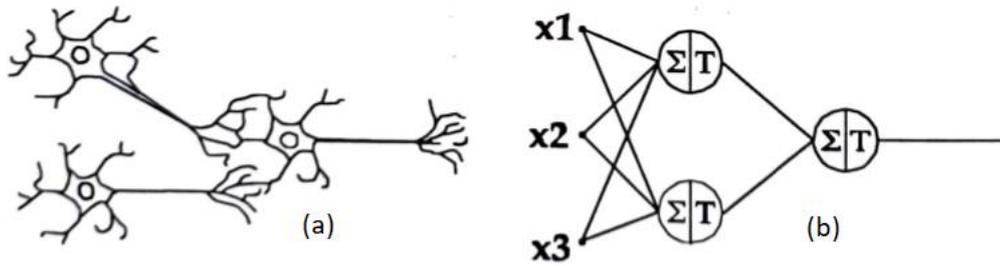


Figura 4. Analogia entre neurônios (a) naturais e (b) artificiais (TAFNER et al., 1996).

Uma rede neural pode ser definida como um sistema computacional paralelo constituído de unidades de processamento simples (neurônios), que têm a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para o uso. É considerado um sistema paralelo, pois os neurônios encontram-se dispostos em uma ou mais camadas paralelas e interligados entre si por um grande número de conexões, formando a rede. Estas conexões geralmente são associadas a pesos sinápticos que armazenam o conhecimento representado pela rede e ponderam a entrada recebida por cada neurônio da rede (BRAGA et al., 2000; HAYKIN, 2001; MIGUEL et al., 2018; REIS et al., 2018).

O neurônio é a unidade de processamento de informação que é fundamental para a operação de uma rede neural artificial. Em seu modelo básico (Figura 5), um sinal x_m na entrada da sinapse j conectada ao neurônio k é multiplicado pelo peso sináptico w_{km} , o qual inclui valores positivo e negativos; uma junção aditiva soma os sinais de entrada, ponderados pelas respectivas sinapses do neurônio; uma função de ativação que restringe o intervalo permissível de amplitude do sinal de saída a um valor finito, normalmente dentro do intervalo fechado entre 0 e 1 ou alternativamente entre -1 e 1; e inclui um bias aplicado externamente (b_k), que tem o efeito de aumentar ou diminuir a entrada líquida da função de ativação, se for positivo ou negativo, respectivamente (HAYKIN, 2001).

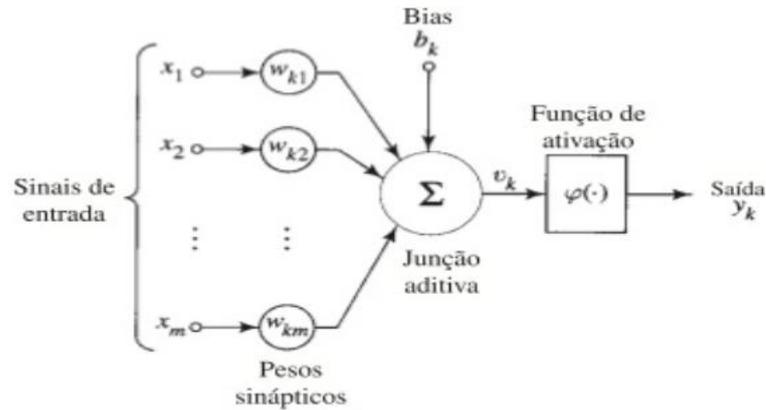


Figura 5. Modelo de um neurônio artificial (HAYKIN, 2001).

Segundo Fausett (1994), uma rede neural é caracterizada por seu padrão de conexão entre os neurônios (arquitetura), seu método de determinação de pesos nas conexões (algoritmo de treinamento) e sua função de ativação.

A definição da arquitetura de uma RNA é um parâmetro importante na sua concepção, uma vez que ela restringe o tipo de problema que pode ser tratado pela rede. Fazem parte de sua definição os seguintes parâmetros: número de camadas da rede, número de neurônios em cada camada, tipo de conexão entre os neurônios e topologia da rede (BRAGA et al., 2000; MARTINS et al., 2016).

Miranda et al. (2009) ressaltam que uma das maiores dificuldades no uso das RNA é justamente a escolha da melhor arquitetura, uma vez que este processo é experimental e por isso, demanda tempo de execução. Na prática o processo deve ser aplicado com o intuito de testar os vários métodos de aprendizado e as diferentes configurações que uma rede possa ter para a resolução do problema em questão. Esse padrão de conexão entre os neurônios é basicamente a forma como estão organizados. No geral, são identificadas três classes de arquiteturas de rede fundamentalmente diferentes: redes alimentadas adiante com camada única, redes alimentadas diretamente com múltiplas camadas e redes recorrentes.

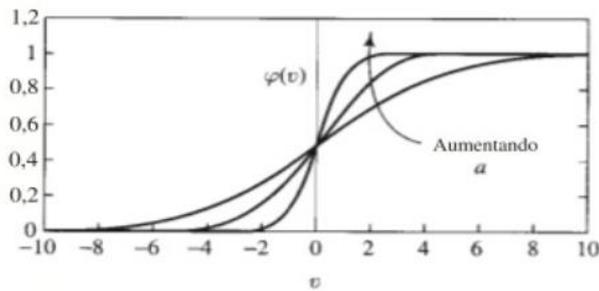
Redes alimentadas com camada única possuem apenas uma camada de neurônios de processamento (saída), visto que a camada de entrada de qualquer RNA não realiza processamento de informações, apenas repassa os sinais de entrada ponderados para a primeira camada; este modelo de rede só consegue resolver problemas linearmente separáveis (BRAGA et al., 2000; BINOTI, 2010).

Redes alimentadas diretamente com múltiplas camadas possuem uma ou mais camadas ocultas, cujos neurônio ocultos têm a função de intervir entre a entrada externa e a saída da rede de maneira útil. Não existe uma regra específica que defina o número de camadas escondidas, podendo variar de 0 a n camadas. Com a adição dessas camadas ocultas, a rede passa a ser capaz de extrair estatísticas de ordem elevada. Os sinais de saída de uma camada precedente são utilizados como entradas para a camada subsequente, e o conjunto de sinais de saída dos neurônios da camada de saída (final) da rede constitui a resposta final da rede (HAYKIN, 2001).

Por fim, as redes recorrentes possuem conexões de realimentação, que proporcionam um comportamento dinâmico, o que provoca um impacto profundo na capacidade de aprendizagem da rede e no seu desempenho. Pode consistir de uma única camada de neurônios com cada neurônio alimentando seu sinal de saída de volta para as entradas de todos os outros neurônios (HAYKIN, 2001).

Quanto ao tipo de conexão, quando o sinal de saída de um neurônio não pode ser usado como entrada de neurônios em camadas anteriores, é chamada *feedforward* (acíclica); quando uma rede possui todas as saídas dos neurônios de uma camada conectadas com todos os neurônios da próxima camada é chamada de *fully connected* (amplamente conectada); e quando o sinal de saída de um neurônio servir de entrada para a mesma camada, ou uma camada anterior, a rede possui uma característica chamada de *feedback* (realimentação) (TAFNER et al., 1996; BRAGA et al., 2000).

A função de ativação é uma função de ordem interna, cuja atribuição é fazer acontecer um nível de ativação dentro do próprio neurônio, ou seja, é uma decisão tomada pelo neurônio sobre o que fazer com o valor resultante do somatório das entradas ponderadas, tendo efeito restrito ao próprio neurônio. A função sigmoide (Figura 6), cujo gráfico possui forma de “s”, é a mais utilizada na construção de redes neurais artificiais, sendo definida como uma função estritamente crescente que exhibe um balanceamento adequado entre comportamento linear e não-linear, assumindo um intervalo contínuo de valores entre 0 e 1 (HAYKIN, 2001).



$$\varphi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-av)}$$

Onde:

a é o parâmetro de inclinação da função sigmóide.

Figura 6. Função sigmóide (HAYKIN, 2001).

O processo de aprendizagem ocorre de forma iterativa e consiste nos ajustes aplicados aos pesos sinápticos e níveis de bias, que são análogos às intensidades dos sinais de sinapses dos neurônios biológicos. Esses ajustes fazem com que a rede se torne mais instruída sobre seu ambiente após cada iteração do algoritmo de aprendizagem (BRAGA et al., 2000; OLIVEIRA et al., 2015).

Existem diversos algoritmos de aprendizagem, que são definidos como conjuntos preestabelecidos de regras bem definidas para a solução de um problema de aprendizagem, diferindo entre si basicamente pela maneira pela qual o ajuste dos pesos é feito. Genericamente, pode-se dizer que aprendizagem é um procedimento onde os pesos e bias são adaptados através de estímulos oriundos do ambiente ao qual a rede está inserida, sendo que o tipo de aprendizagem é determinado pelo modo como ocorre a modificação desses parâmetros. Por sua vez, a generalização é definida como o fato da rede neural artificial produzir saídas adequadas para entradas que não estavam presentes no seu treinamento (fase de aprendizagem) (BRAGA et al., 2000; OLIVEIRA et al., 2015).

Diversos métodos para treinamento de redes foram desenvolvidos, podendo ser agrupados em dois paradigmas principais: aprendizado supervisionado e aprendizado não-supervisionado.

O aprendizado supervisionado é o mais comum no treinamento das RNAs, sendo assim chamado porque a entrada e a saída desejadas para a rede são fornecidas por um supervisor (professor) externo, com o objetivo de ajustar os parâmetros da rede, de forma a encontrar uma ligação entre os pares de entradas e saída fornecidos. De forma mais detalhada, sempre que for apresentada à rede uma entrada, deverá ser verificado se a saída obtida confere com a saída desejada. Sendo diferente, a rede deverá ajustar os pesos de forma que armazene o conhecimento desejado. Essa iteratividade do treino deverá ser repetida com

todo o conjunto de treinamento até que a taxa de acerto esteja dentro de uma faixa considerada satisfatória (TAFNER et al., 1996; BRAGA et al., 2000).

O aprendizado não-supervisionado não possui um professor ou supervisor para acompanhar o processo de aprendizado. Para o treinamento da rede, somente os valores de entrada são utilizados. A partir do momento em que a rede estabelece uma harmonia com as regularidades estatísticas da entrada de dados, desenvolve-se nela uma habilidade de formar representações internas para codificar características de entrada e criar novas classes ou grupos automaticamente. Entretanto, este tipo de aprendizado só é possível quando há redundância dos dados de entrada, pois sem isso seria impossível encontrar qualquer padrão ou características nos dados (TAFNER et al., 1996; BRAGA et al., 2000).

Binoti et al. (2014) destacam que muitas formas de redes neurais artificiais são propostas e usadas com variações, principalmente no número de neurônios por camada, tipo de função de ativação dos neurônios, número de camadas ocultas e tipo de conexão entre os neurônios. Além disso, os algoritmos utilizados interferem significativamente no tempo de treinamento e na eficiência de uma rede, assim como os parâmetros e coeficientes utilizados em seu treinamento.

Redes perceptrons de múltiplas camadas (MLP) possuem uma ou mais camadas ocultas, além das camadas de entrada e de saída, que capacitam a rede a aprender tarefas complexas extraíndo progressivamente as características mais significativas dos padrões de entrada (Figura 7). O sinal de entrada se propaga para frente através da rede, camada por camada. Este tipo de rede vem sendo bastante aplicado para resolução de problemas complexos, através de seu treinamento de forma supervisionada com um algoritmo muito popular conhecido como *error back-propagation* (algoritmo de retropropagação do erro), o qual é baseado na regra de aprendizagem por correção de erro (HAYKIN, 2001; HEIDARI et al., 2016; ESTEBAN et al., 2017).

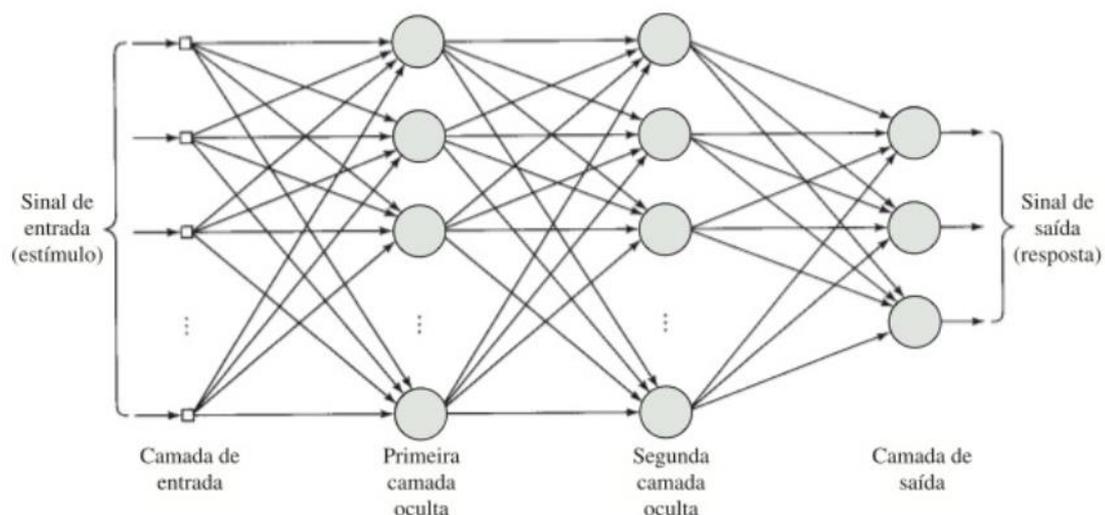


Figura 7. Arquitetura de uma rede perceptron de múltiplas camadas com duas camadas ocultas (HAYKIN, 2001).

As características mais atrativas das RNAs são: a elevada habilidade em mapear sistemas não-lineares, a alta capacidade de aprendizado de comportamentos envolvidos a partir de informações obtidas previamente e a generalização para entradas não contempladas no treinamento, a possibilidade de inclusão de variáveis qualitativas, o grande potencial para aplicação em sistemas de previsão, a robustez da modelagem na presença de outliers e a não exigência dos pressupostos de normalidade, linearidade e homocedasticidade, (SILVA et al., 2010; EGRIOGLU et al., 2014; MARTINS et al., 2016; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2019).

Esses sistemas já vêm sendo aplicados por alguns segmentos na área florestal, para modelagem da produção florestal e de biomassa, controle do processo de secagem da madeira, previsão da atividade de composto bioativo contra fungos xilófagos e estimativa do teor de umidade do solo, identificação de madeiras, estimativa de densidade da madeira e de propriedades de resistência mecânica, análise do comportamento de compósitos madeira-plástico, previsão de densidade energética, dentre outros (CASTRO et al., 2013; VICENTE et al., 2013; FERNANDES et al., 2013; GE; CHEN, 2014; MIGUEL et al., 2015; ZANETTI et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2015; FINI et al., 2015; VALE et al., 2017; MIGUEL et al., 2018; REIS et al., 2018).

5. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado no Laboratório de Preservação de Madeiras da Fazenda Água Limpa, pertencente à Universidade de Brasília (UnB), em colaboração com o Laboratório de Produtos Florestais (LPF) do Serviço Florestal Brasileiro (SFB) e com o Laboratório de Automação, Quimiometria e Química Ambiental (AQQUA) do Instituto de Química da Universidade de Brasília.

5.1 Obtenção do material e preparo dos corpos de prova

Foram adquiridas no mercado madeireiro do Distrito Federal duas pranchas de madeira nas dimensões 0,20 x 0,06 x 2 m (larg. x espes. x compr.) de quatro espécies de madeira, selecionadas levando em consideração a massa específica e o teor de extrativos (Tabela 1).

Tabela 1. Espécies de madeiras estudadas.

Espécie	Massa específica
<i>Simarouba amara</i> (marupá)	Baixa
<i>Ceiba pentandra</i> (sumaúma)	Baixa
<i>Micropholis melinoniana</i> (curupixá)	Média
<i>Amburana cearensis</i> (cerejeira)	Média

Após identificação do material por especialistas em anatomia de madeira do Laboratório de Produtos Florestais (LPF), foram confeccionadas 104 estacas, sendo 26 para cada espécie, nas dimensões 0,05 x 0,03 x 0,50 m (larg. x espes. x compr.), livres de defeitos e de ataques de organismos xilófagos. As estacas passaram por processo de aclimação (temperatura de 20 ± 3 °C e teor de umidade $65 \pm 1\%$) previamente à realização de tratamento químico preservante.

5.2 Determinação da massa específica básica

A massa específica básica foi determinada segundo a metodologia da norma ASTM D2395-14, a partir da confecção de 10 corpos de prova por espécie, nas dimensões de 2,0 x 2,0 x 10,0 cm, sendo a maior dimensão no sentido axial.

5.3 Determinação da composição química

As análises químicas foram realizadas na Área de Química, Adesivos e Borracha Natural do LPF/SFB. Primeiramente, foi realizada a moagem do material das quatro espécies florestais, sendo utilizada a fração de 40/60 mesh. Em seguida, o material moído foi analisado quimicamente por via úmida (tradicional), utilizando o sistema de triplicatas para determinação do teor de extrativos, do teor de cinzas sem extrativos, do teor de lignina solúvel e insolúvel, conforme as normas TAPPI - T 204 om-88, TAPPI - T 211 om-93, LAP – 003 e LAP – 004 (TEMPLETON; EHRMAN, 1995), respectivamente. O teor de holocelulose foi obtido a partir da diferença entre a composição química total e a composição da fração não-carboidrato (Equação 1).

$$Hol = 100\% - L_{total} - C \quad (1)$$

Em que:

Hol = teor de holocelulose (%);

L_{total} = teor de lignina total (%);

C = teor de cinzas, a 525°C (%).

5.4 Tratamento químico preservante

O tratamento com o preservante químico hidrossolúvel arseniato de cobre cromatado tipo C (CCA-C) foi realizado em usina de preservação de madeiras do Distrito Federal, em autoclave industrial e seguindo o procedimento do processo Bethell de célula cheia (Figura 8). Após o tratamento químico, as amostras permaneceram em ambiente coberto e ventilado durante 20 dias visando à fixação dos ingredientes ativos (Figura 9).

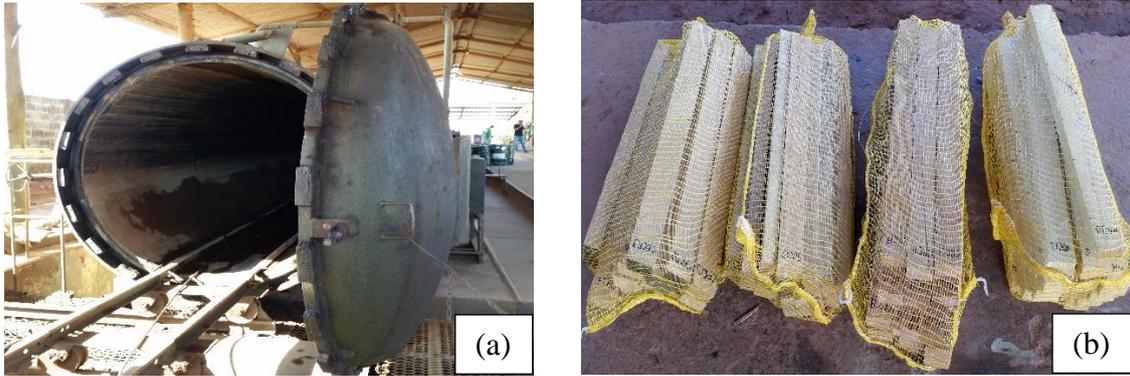


Figura 8. (a) Autoclave industrial para tratamento químico de madeiras; (b) Acomodação das amostras para posterior tratamento sob pressão em autoclave.



Figura 9. Acomodação das amostras para fixação de ingredientes ativos após o tratamento químico.

5.5 Determinação da retenção e penetração do produto químico

A penetração do produto químico preservante foi determinada por meio de reação colorimétrica utilizando o reagente Cromoazurol S, de acordo com a norma NBR 6232 (ABNT, 2013).

A retenção foi determinada através da concentração dos ingredientes ativos por metro cúbico (kg i.a/m^3), individualmente, conforme a norma NBR 6232 (ABNT, 2013).

5.6 Delineamento experimental

Os tratamentos (Tabela 2) foram definidos combinando-se as espécies de madeira e o produto químico preservante utilizado, totalizando 8 tratamentos e 104 amostras.

Tabela 2. Delineamento experimental.

Tratamentos	Espécie de madeira	Produto químico preservante	Corpos de prova
T1	<i>Simarouba amara</i>	Sem produto	13
T2		CCA-C	13
T3	<i>Ceiba pentandra</i>	Sem produto	13
T4		CCA-C	13
T5	<i>Micropholis melinoniana</i>	Sem produto	13
T6		CCA-C	13
T7	<i>Amburana cearensis</i>	Sem produto	13
T8		CCA-C	13

5.7 Ensaio de durabilidade natural

O ensaio de durabilidade natural foi realizado em campo de apodrecimento experimental instalado na Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília (FAL/UnB), 15°56'40,8" S e 47°55'7,2" W, região de Cerrado no Distrito Federal, no período de maio de 2016 a setembro de 2019 (Figura 10).

As 104 amostras foram distribuídas aleatoriamente em campo, utilizando a função “aleatório” do Microsoft Excel 2016, e foram parcialmente enterradas até a metade do comprimento padrão (0,25 m), com as faces maiores expostas para o norte, e distanciadas umas das outras por 1 m, na linha e na coluna. Avaliações periódicas foram realizadas para acompanhamento do processo de biodeterioração.



Figura 10. Campo de apodrecimento instalado em maio de 2016 na Fazenda Água Limpa/UnB.

5.8 Avaliações periódicas

As avaliações visuais, químicas e físicas foram realizadas quadrimestralmente em todas as estacas instaladas no campo de apodrecimento a partir de setembro de 2016 (Tabela 3). No ano de 2019 houve apenas uma avaliação, em decorrência do cronograma estabelecido antes da implantação do campo de apodrecimento.

Tabela 3. Total de avaliações realizadas nas amostras instaladas no campo de apodrecimento após sua implantação.

Ano	Mês de avaliação		
	Janeiro	Maio	Setembro
2016	-	Implantação do campo	1ª avaliação
2017	2ª avaliação	3ª avaliação	4ª avaliação
2018	5ª avaliação	6ª avaliação	7ª avaliação
2019	-	-	8ª avaliação

Visando o melhor aprendizado das redes neurais artificiais, foram realizadas médias das avaliações quadrimestrais, as quais foram transformadas em avaliações anuais (Tabela 4).

Tabela 4. Avaliações anuais realizadas nas amostras instaladas no campo de apodrecimento após sua implantação.

Ano	Avaliações quadrimestrais	Avaliação
2016	Implantação + 1ª avaliação	ANO 1
2017	2ª + 3ª + 4ª avaliações	ANO 2
2018	5ª + 6ª + 7ª avaliações	ANO 3
2019	8ª avaliação	ANO 4

5.9 Inspeção visual do estado de sanidade das estacas de madeira

As avaliações do estado de sanidade das amostras foram realizadas no Laboratório de Preservação de Madeiras da Fazenda Água Limpa/UnB.

Inicialmente, as amostras parcialmente enterradas no solo foram avaliadas aplicando-se um leve impacto perpendicularmente ao topo, visando a sua remoção. Caso

não ocorresse a quebra da amostra de madeira, esta era cuidadosamente removida do solo a fim de que o distúrbio do solo fosse o menor possível, limpa e analisada visualmente por dois avaliadores quanto ao seu estado de sanidade, segundo o sistema de notas combinadas proposto pela ASTM D 1758 (ASTM, 2006) (Tabela 5).

Tabela 5. Sistema de classificação da análise visual baseado na porcentagem de deterioração da seção transversal ASTM D 1758 (ASTM, 2006).

Nota	Fungos	Insetos
	Descrição da condição	Descrição da condição
10	Sem apodrecimento; traços de ataque permitidos	Sem ataque; 1 a 2 pequenos buracos permitidos
9	Traços de ataque até 3% da seção transversal	Buracos até 3% da seção transversal
8	Apodrecimento de 3 a 10% da seção transversal	Penetração de 3 a 10% da seção transversal
7	Apodrecimento de 10 a 30% da seção transversal	Penetração de 10 a 30% da seção transversal
6	Apodrecimento de 30 a 50% da seção transversal	Penetração de 30 a 50% da seção transversal
4	Apodrecimento de 50 a 75% da seção transversal	Penetração de 50 a 75% da seção transversal
0	Quebra	Quebra

5.10 Perda de massa e teor de umidade das estacas de madeira

Após a análise visual, as estacas foram pesadas em balança digital GX-1000, da marca GX Series, com precisão de 0,001 g, a fim avaliar a proporção de perda de massa decorrente do processo de ataque de fungos e cupins e da ação do intemperismo, segundo a Equação 2.

$$PM = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100 \quad (2)$$

Em que:

PM = perda de massa (%);

M_i = massa inicial (g);

M_f = massa final (g).

O teor de umidade das amostras foi determinado em três posições ao longo da peça (porção mediana superior, central e mediana inferior), com auxílio do medidor capacitivo KT-50, da marca Klonteser, regulado segundo a massa específica da madeira.

5.11 Avaliação não destrutiva por ondas ultrassônicas

A propagação das ondas ultrassônicas nas estacas foi avaliada com auxílio do equipamento de ultrassom Pundit Lab, da empresa Proceq. O aparelho possui resolução de 0,1 μ s, capacidade de 500V, transmissão contínua do sinal, sendo composto por dois transdutores piezoelétricos com encapsulamento metálico de ondas longitudinais de 54 kHz e de face plana.

Foram realizadas medições do tempo de propagação das ondas ultrassônicas no sentido longitudinal e no sentido transversal (região e afloramento), em microssegundos (μ s) (Figura 11). Em seguida, foi determinada a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas a partir da Equação 3. Para facilitar o acoplamento dos transdutores metálicos às estacas de madeira, foi aplicado gel condutor neutro.

$$v_0 = \frac{L}{t * 10^{-6}} \quad (3)$$

Em que:

v_0 = velocidade de propagação da onda, m/s;

L = distância percorrida pela onda, m;

t = tempo de trânsito da onda, μ s.



Figura 11. Pontos de coleta de dados referentes às ondas ultrassônicas (Adaptado de TELES (2014)).

5.12 Análise dos dados

Os dados de massa e de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas das estacas de madeira foram submetidos à análise estatística descritiva, considerando os valores médios para cada tratamento em cada período de avaliação.

Em razão da ausência de normalidade e da dependência dos dados, foi realizado o teste de Friedman, como uma alternativa ao experimento fatorial em blocos na análise de variância regular.

Foram avaliados os efeitos do tratamento químico e do período de avaliação sobre a velocidade de propagação da onda ultrassônica nos sentidos longitudinal e transversal. Posteriormente, foi realizado teste de Bonferroni ao nível de 5% de significância ($p < 0,05$) para comparação das médias dos tratamentos.

5.13 Avaliação não destrutiva por espectroscopia de infravermelho

Os espectros de infravermelho próximo foram obtidos por meio do aparelho portátil MicroNIR™ 1700 Spectrometer, da empresa JDSU, com 6,2 nm de resolução e faixa espectral de 950 a 1650 nm.

A partir do padrão de politetrafluoretileno fornecido pelo fabricante, foram obtidos espectros de fundo e branco, a cada 60 minutos. O software do equipamento foi configurado nos parâmetros: tempo de integração de 2.000 μ s; 100 varreduras para cada espectro; e faixa espectral de 1000 a 1650 nm, visando minimizar os ruídos.

Foram coletados 8 espectros em cada estaca, diretamente na superfície da região de afloramento (porção central), em cada período de avaliação em campo (Figura 12). Com auxílio do software Matlab, versão R2018a, estes espectros foram submetidos ao pré-processamento de normalização vetorial (Variável Normal Padrão, do inglês *Standard Normal Variate*), o qual é utilizado para corrigir efeitos aditivos e multiplicativos de deslocamento de linha de base e assim, melhorar a precisão da análise.

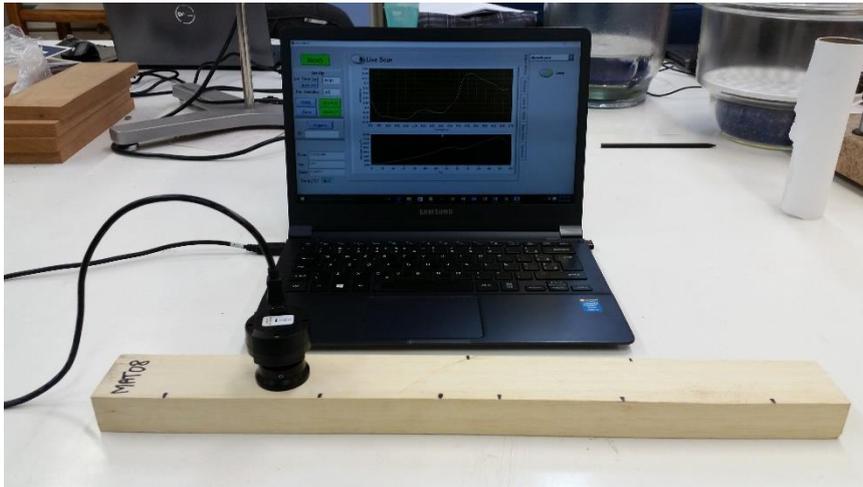


Figura 12. Medição do espectro de absorvância no infravermelho próximo nas estacas de madeira.

5.14 Estimativa da vida útil da madeira por redes neurais artificiais

5.14.1 Treinamento das redes neurais artificiais

Foram treinadas de modo supervisionado (valores de entrada e de saída fornecidos para as redes) 200 redes do tipo *Perceptron* de Múltiplas Camadas (MLP, do inglês *Multilayer Perceptron*), das quais 100 foram associadas à velocidade de propagação da onda ultrassônica e outras 100 foram correlacionadas aos espectros de infravermelho próximo (NIR – do inglês *Near infrared*). Este processo foi realizado utilizando-se 80% dos dados selecionados aleatoriamente, de modo a contemplar toda a variação da base de dados.

As variáveis de entrada (preditoras) categóricas utilizadas foram: espécie de madeira (marupá e curupixá), tratamento químico (sem tratamento e com CCA-C), período de avaliação (anos 1, 2, e 3); e as variáveis contínuas foram: velocidade de propagação da onda ultrassônica (ultrassom) e a intensidade de absorvância no infravermelho próximo (NIR). A variável predita foi a perda de massa, decorrente do processo de biodeterioração das estacas de madeira.

A configuração referente ao número de neurônios da camada de entrada foi definida conforme as variáveis preditoras, sendo 1 neurônio para cada nível das variáveis categóricas e 1 neurônio para cada variável contínua, totalizando 8 neurônios (Tabela 6). Na camada oculta, o número de neurônios foi otimizado pela ferramenta *Intelligent Problem Solver* (IPS) do *software* Statistica versão 12 (STATSOFT INC, 2011), a qual é responsável por determiná-lo de forma a possibilitar a melhor extração de informações

da camada de entrada e correlação com os valores de saída, atingindo assim a menor taxa de erro nas predições. A camada de saída foi constituída por 1 neurônio, referente à perda de massa.

Foram testadas as funções de ativação sigmoidal, logística, exponencial, tangente, identidade e seno, e as combinações utilizadas para camada oculta e de saída foram determinadas pelo *Intelligent Problem Solver* (IPS). O algoritmo utilizado para treinamento das redes foi o quasi-Newton de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) (GUERROUT et al., 2017).

Tabela 6. Número de neurônios utilizados para treinamento das redes neurais artificiais.

Variáveis preditoras	Camada de entrada	Camada oculta	Camada de saída
Espécie	2		
Tratamento químico	2	IPS	1
Período de avaliação	3		
Ultrassom	1		
Espécie	2		
Tratamento químico	2	IPS	1
Período de avaliação	3		
NIR	1		

Os pesos sinápticos foram inicialmente gerados aleatoriamente (HEATON, 2011) e, com a continuidade do processo de treinamento, o valor individual de atualização introduzido para cada peso foi modificado com base na função de erro (Equação 4).

$$erro\% = \frac{(\hat{Y}-Y)}{Y} * 100 \quad (4)$$

Em que:

Y = valores observados;

\hat{Y} = valores estimados pelas redes neurais artificiais.

Como critério de parada do treinamento das redes utilizou-se o número total de ciclos ou o erro quadrático médio, ambos otimizados pelo *Intelligent Problem Solver* (IPS), visando evitar problemas de perda de poder de generalização da rede causado pelo

número exagerado de ciclos (*overfitting*) ou de desempenho inferior devido ao pequeno número de ciclos (*underfitting*) (CHEN et al., 2014).

Foram selecionadas as cinco melhores redes treinadas, com base na:

- a) Avaliação da correlação entre os valores observados (Y) e os estimados (\hat{Y}) pelas redes ($r_{Y\hat{Y}}$) (Equação 5), a qual indica o grau de associação entre valores observados e estimados, sendo que, quanto mais próxima de 1, maior a correlação entre as variáveis;

$$r_{Y\hat{Y}} = \frac{cov(Y, \hat{Y})}{\sqrt{s^2(Y)s^2(\hat{Y})}} \quad (5)$$

Em que:

Y = valores observados;

\hat{Y} = valores estimados pelas redes neurais artificiais.

$r_{Y\hat{Y}}$ = correlação entre os valores observados e estimados;

$cov(Y, \hat{Y})$ = covariância entre os valores observados e estimados;

s^2 = variância.

- b) Raiz do erro quadrático médio (RMSE%, do inglês *Root Mean Square Error*) (Equação 6), a qual avalia a diferença quadrática média entre os valores observados e os valores estimados, onde os menores valores de erro indicam uma melhor precisão da estimativa;

$$RMSE(\%) = \frac{100}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (6)$$

Em que:

Y = valores observados;

\hat{Y} = valores estimados pelas redes neurais artificiais.

\bar{Y} = média dos valores observados;

n = número total de dados.

- c) Distribuição gráfica dos resíduos (erros) percentuais em relação aos valores observados (BINOTI et al., 2015).

5.14.2 Validação das redes neurais artificiais

A rede que apresentou os melhores resultados foi aplicada a 20% dos dados coletados em campo de apodrecimento, os quais não fizeram parte do grupo amostral

utilizado para o treinamento, para validar sua capacidade de reproduzir o conhecimento adquirido.

Além disso, procedeu-se ao teste *t* de Student para verificar a existência de diferenças significativas entre os valores reais e as estimativas de perda de massa realizadas pela rede aplicada. O processo de validação foi realizado utilizando-se o *software* Statistica versão 12 (STATSOFT INC, 2011).

5.15 Vida útil

A vida útil é definida como o tempo necessário para que 50% dos corpos-de-prova de um lote de madeira estejam intensamente atacados ou destruídos (LOPEZ; MILANO, 1986). Portanto, em função da quantidade de amostras em campo e da perda de massa máxima tolerável decorrente do processo de biodeterioração, foi determinada a vida útil das espécies ensaiadas, pelo método tradicional em campo de apodrecimento e por redes neurais artificiais.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Massa específica e teor de extrativos

A Tabela 7 apresenta os resultados de massa específica básica e teor de extrativos obtidos para as espécies de madeira utilizadas no presente estudo.

Tabela 7. Massa específica básica e teor de extrativos das espécies de madeira estudadas (ASTM D2395-14, TAPPI-T 204 om-88).

Espécie	Massa específica (g/cm³)	Teor de extrativos (%)
<i>Simarouba amara</i> (marupá)	0,349	2,07
<i>Ceiba pentandra</i> (sumaúma)	0,455	1,71
<i>Micropholis melinoniana</i> (curupixá)	0,588	2,61
<i>Amburana cearensis</i> (cerejeira)	0,604	12,25

Fonte: VIEIRA (2019).

6.2 Retenção e penetração

A solução do preservante hidrossolúvel arseniato de cobre cromatado (CCA-C) utilizada para tratamento das amostras apresentou concentração total de 1,6%, pH (a

21°C) igual a 2,5 e distribuição de ingredientes ativos dentro dos limites de referência estabelecidos na literatura (Tabela 8).

Tabela 8. Resultados da análise química da solução de CCA-C utilizada para tratamento das amostras.

Ingrediente	Distribuição dos ingredientes ativos (%)	Concentração dos ingredientes ativos no balanceamento químico (%)	Valores de referência para CCA-C (%)*
Cromo (CrO ₃)	0,8	48,8	47,5
Cobre (CuO)	0,3	19,5	18,5
Arsênio (As ₂ O ₅)	0,5	31,7	34,0
Total	1,6	100,0	100,0

*Fonte: Lepage (1986).

A Tabela 9 e as Figuras 13 e 14 apresentam os resultados da análise de retenção e penetração dos ingredientes ativos de CCA-C para amostras expostas em campo de apodrecimento durante 0 e 40 meses.

Tabela 9. Resultados da análise de retenção e penetração dos ingredientes ativos de CCA-C nas amostras tratadas das quatro espécies de madeiras (NBR 6232 – ABNT, 2013).

Espécie	Penetração	Retenção (kg i.a./m ³)			
		CrO ₃	CuO	As ₂ O ₅	Total i.a.
Sumaúma (0 meses)	PCI	2,5	0,8	0,9	4,2
Sumaúma (40 meses)	PI	8,9	3,2	4,8	16,9
Marupá (0 meses)	PR	3,2	1,1	1,1	5,4
Marupá (40 meses)	PR	4,6	1,9	2,9	9,4
Curupixá (0 meses)	PI	3,4	1,6	2,0	7,0
Curupixá (40 meses)	PR	4,16	1,69	2,30	8,15
Cerejeira (0 meses)	SU	0,0	0,0	0,0	0,0
Cerejeira (40 meses)	SU	0,0	0,0	0,0	0,0

Onde: PCI: penetração parcial e irregular; PR: penetração profunda e regular; PI: penetração profunda e irregular; SU: penetração superficial ou sem penetração; i.a.: ingrediente ativo.

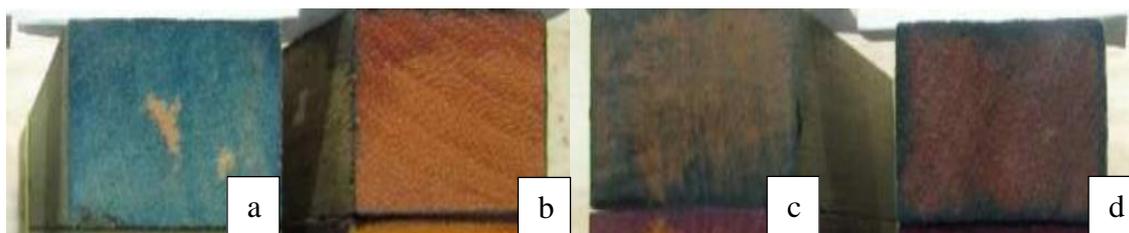


Figura 13. Análise de penetração do preservante hidrossolúvel CCA-C nas amostras de (a) marupá, (b) cerejeira, (c) curupixá e (d) sumaúma com 0 meses de exposição em campo de apodrecimento.

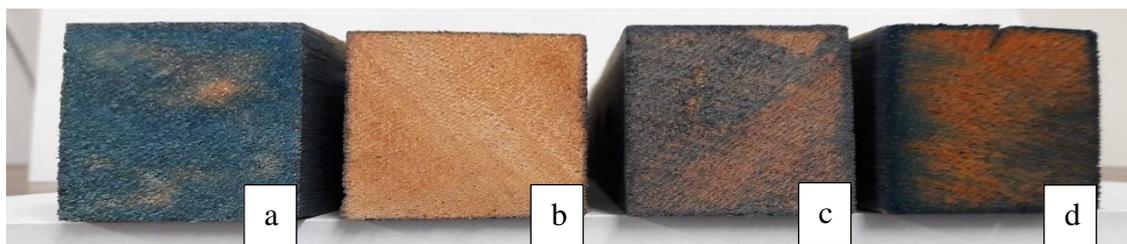


Figura 14. Análise de penetração do preservante hidrossolúvel CCA-C nas amostras de (a) marupá, (b) cerejeira, (c) curupixá e (d) sumaúma após 40 meses de exposição em campo de apodrecimento.

No período de 0 meses, prévio à instalação das amostras em campo, apenas a madeira de marupá apresentou penetração profunda e regular, estando de acordo com IBAMA (2002), o qual define esta espécie como muito fácil de preservar em processo sob pressão. A madeira de sumaúma, por sua vez, apresentou penetração desuniforme e não total pela extensão da porção permeável, apesar de ser classificada pelos mesmos autores como bastante permeável às soluções preservativas em impregnação sob pressão. A madeira de curupixá apresentou penetração profunda, porém irregular; enquanto que na madeira de cerejeira ocorreu penetração apenas superficial, apesar de ser considerada uma espécie moderadamente permeável a tratamentos químicos preservativos (IBAMA, 2002). Isto sucedeu provavelmente devido a uma maior porção de cerne observada na amostra selecionada, e também por esta espécie apresentar maior massa específica e consequentemente, menor permeabilidade.

Com relação à retenção de ingredientes ativos nas amostras (Tabela 9), verificou-se que para o período de 0 meses, apenas a madeira de curupixá apresentou valores dentro do estabelecido pela norma NBR 9480 (ABNT, 2009), a qual sugere um valor mínimo de retenção de 6,5 kg i.a/m³.

Os baixos valores de retenção nas amostras de marupá e sumaúma, assim como a irregularidade da penetração, verificada em curupixá e sumaúma, podem ter ocorrido em razão do posicionamento não favorável das amostras dentro da autoclave durante o tratamento, ou devido à presença de uma maior porção de cerne nas amostras (menor permeabilidade) ou até em decorrência de fatores intrínsecos ao funcionamento do autoclave.

Após 40 meses de exposição das amostras em campo de apodrecimento, observou-se ainda uma significativa retenção do produto químico preservante nas amostras. Isto indica um alto nível de fixação e, conseqüentemente, um baixo nível de lixiviação da solução.

6.3 Ensaio de durabilidade natural

6.3.1 Avaliação visual

As Figuras 15 a 18 apresentam as médias das notas de avaliação visual referentes ao ataque de fungos e cupins para as madeiras de sumaúma, marupá, curupixá e cerejeira, respectivamente, obtidas segundo a norma ASTM D 1758 (ASTM, 2006).

A madeira de sumaúma (Figura 15) sem tratamento apresentou a maior deterioração, com intenso ataque fúngico e de térmitas ao longo do tempo de exposição das amostras em campo de apodrecimento, principalmente na porção soterrada das amostras, o que foi constatado pelo decréscimo significativo das notas e pela perda de todas as estacas no quarto ano de avaliação. Destaca-se que esta espécie apresentou inúmeras rachaduras, tanto na porção superior quanto na porção inferior das estacas, em razão do intemperismo, o que facilitou a colonização e o ataque por fungos e térmitas, principalmente nas amostras não tratadas.

Por outro lado, as amostras de sumaúma tratadas com CCA-C apresentaram um leve ataque de térmitas somente no quarto ano de avaliação, apesar de apresentar massa específica ($0,45 \text{ g/cm}^3$) e resistência natural consideradas baixas, indicando um alto grau de proteção conferido a esta madeira pelo produto químico preservante.

Estes resultados estão de acordo com IBAMA (2002), que considera esta espécie como extremamente vulnerável a insetos e ao apodrecimento quando em contato com o solo; e com os estudos realizados em laboratório por Vieira (2019), que também observou baixa resistência desta espécie ao ataque de fungos apodrecedores.

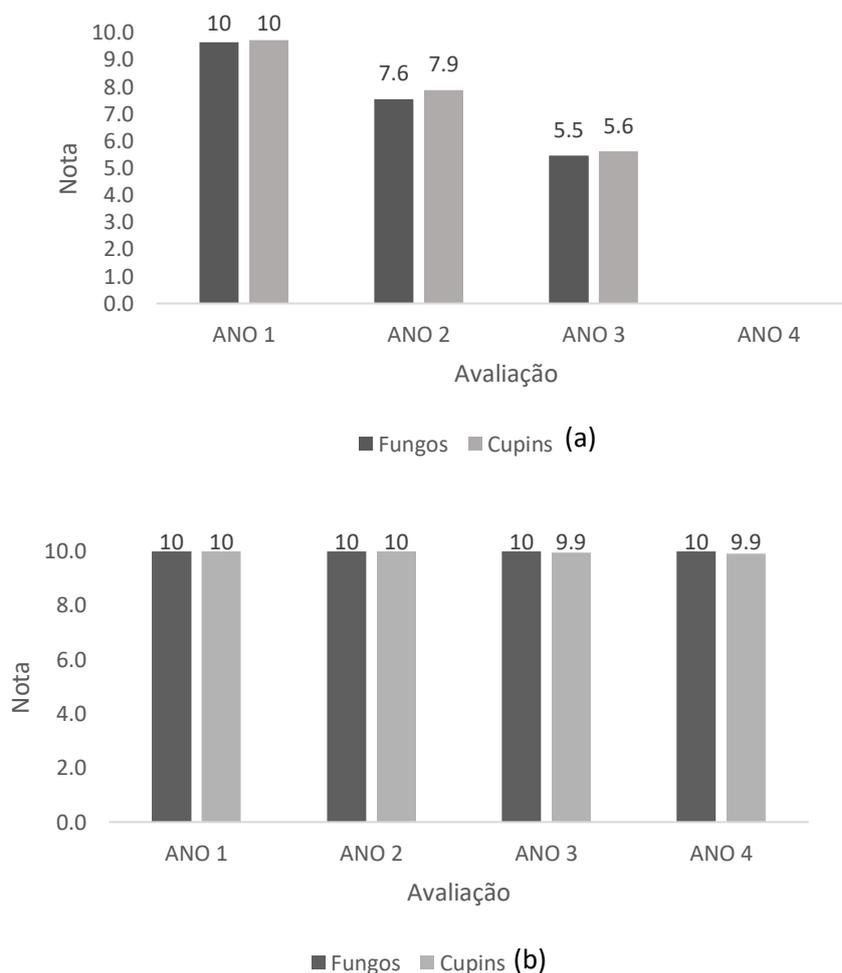


Figura 15. Valores médios das notas de análise visual para fungos e cupins referentes à madeira de sumaúma (a) sem tratamento e (b) tratadas com CCA-C.

A madeira de marupá sem tratamento (Figura 16) começou a apresentar deterioração por fungos no primeiro ano de avaliação, e por térmitas no segundo ano, sendo que a porção soterrada das amostras também foi a mais intensamente atacada. Porém, ao observar as notas no segundo ano, verificou-se uma maior resistência desta espécie ao ataque de organismos xilófagos quando comparada à sumaúma, apesar de sua menor massa específica ($0,34 \text{ g/cm}^3$). Isto pode ter ocorrido em razão do não aparecimento de rachaduras nas amostras de marupá, o que, conseqüentemente, não possibilitou uma abertura de caminhos para esses agentes biodeterioradores; ou devido à presença de uma maior porção de cerne nas estacas. As amostras tratadas com CCA-C apresentaram um leve ataque de térmitas apenas no terceiro ano, resultado que se manteve até a última avaliação.

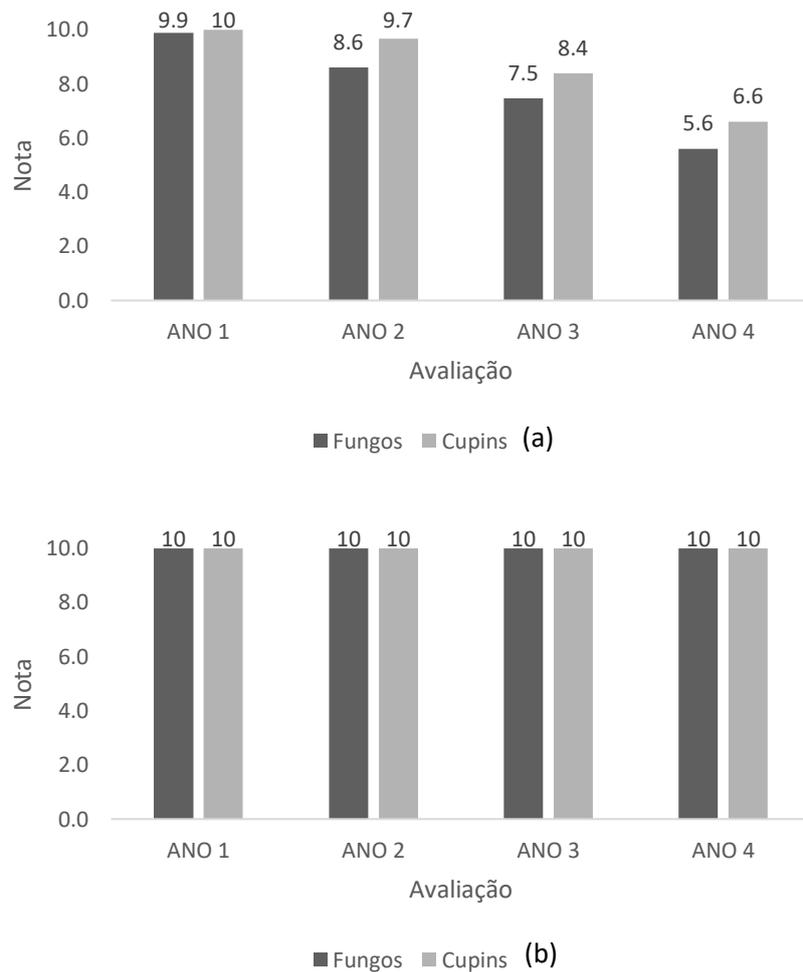


Figura 16. Valores médios das notas de análise visual para fungos e cupins referentes à madeira de marupá (a) sem tratamento e (b) tratadas com CCA-C.

Sob condições semelhantes, Teles (2014) verificou uma baixa durabilidade natural para a madeira de marupá, cuja vida útil foi estimada em torno de 20 meses, enquanto que amostras tratadas com CCA-C apresentaram-se bastante preservadas, sem podridão aparente e sem ataques de térmitas, após 24 meses de avaliação. Ensaio acelerados de laboratório realizados por Costa (2009), Stangerlin et al. (2013) e Vieira (2019), também atestaram a baixa resistência natural desta espécie, uma vez que foi classificada como não resistente ao ataque de fungos de podridão branca e parda.

Para a madeira de curupixá (Figura 17) tratada com CCA-C, apesar de apresentar rachaduras, não foi observado ataque de organismos xilófagos no decorrer das avaliações.

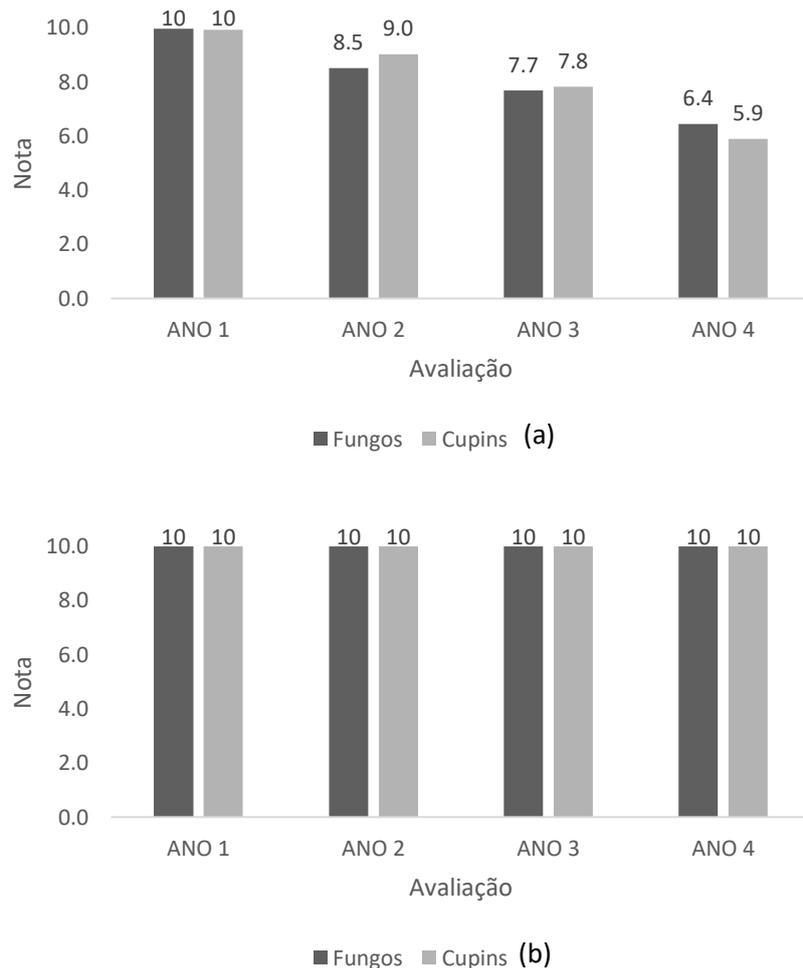


Figura 17. Valores médios das notas de análise visual para fungos e cupins referentes à madeira de curupixá (a) sem tratamento e (b) tratadas com CCA-C.

De maneira oposta, as amostras sem tratamento químico apresentaram um ataque mais consistente de fungos e de térmitas no segundo ano de avaliação, com rachaduras tanto na porção superior quanto na inferior, o que também pode ter influenciado mais fortemente a sua deterioração ao longo do tempo de exposição em campo. Como consequência, esta espécie obteve nota inferior à madeira de marupá no que diz respeito ao ataque por cupins, embora apresente massa específica maior. Vieira (2019), ao avaliar esta espécie em condições de laboratório e sem tratamento químico, observou uma resistência moderada ao ataque de fungos de podridão branca e parda.

As amostras de cerejeira tratadas com CCA-C (Figura 18) permaneceram praticamente sem ataque de fungos ou térmitas, sendo observado apenas um ataque leve

e superficial de cupins na última avaliação, realizada após 40 meses de implantação do campo de apodrecimento.

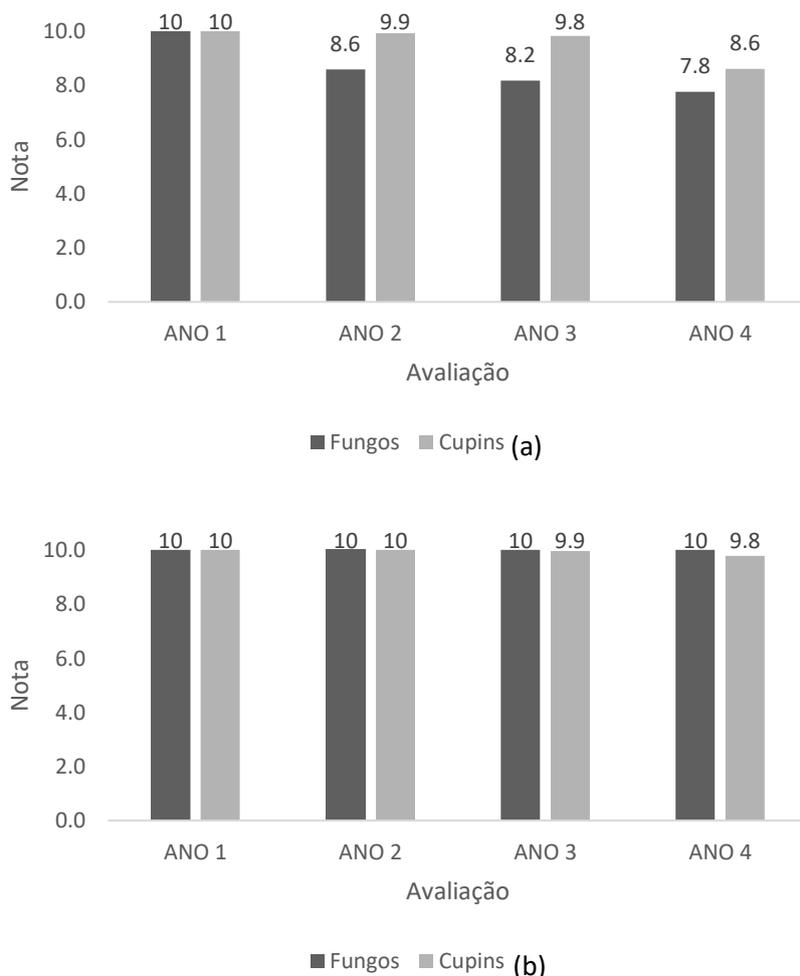


Figura 18. Valores médios das notas de análise visual para fungos e cupins referentes à madeira de cerejeira (a) sem tratamento e (b) tratadas com CCA-C.

Dentre as amostras não tratadas, a madeira de cerejeira (Figura 18) apresentou o melhor desempenho em campo de apodrecimento, com as maiores notas ao final do quarto ano de avaliação (40 meses de exposição), indicando que este tempo não foi suficiente para uma deterioração expressiva das estacas, uma vez que todas as amostras continuavam em bom estado de sanidade no campo. Este resultado condiz com o estudo de Vieira (2019), no qual esta espécie foi classificada como resistente ao ataque de fungos apodrecedores; porém, diverge dos resultados de IPEF e IPT (s.d.), que consideram esta espécie como pouco resistente ao ataque de fungos e cupins xilófagos.

Eaton e Hale (1993) destacam que a propriedade de resistência natural pode apresentar variabilidades dentro de uma espécie e até dentro de uma mesma árvore, decorrentes fatores genéticos, características inerentes à fauna do solo, sistemas silviculturais ou condições climáticas. Dessa forma, é importante que informações locais sobre o desempenho de uma espécie de madeira sejam verificadas antes de especificar seu uso para outras localidades ou para outras situações de risco.

Cabe ressaltar que, apesar de possuírem massas específicas muito próximas (curupixá - 0,58 g/cm³; cerejeira - 0,60 g/cm³), as notas observadas para cerejeira sem tratamento foram destacadamente maiores, o que pode ter sido causado pela ausência de rachaduras causadas pelo intemperismo ou pelo relevante teor de extrativos (12,25%) presente nesta espécie em comparação a curupixá (2,61%).

De modo geral, todas as amostras das quatro espécies de madeiras não tratadas quimicamente apresentaram uma clara tendência de decréscimo das notas ao longo das avaliações, enquanto que as amostras tratadas com CCA-C mantiveram-se mais íntegras, o que pode ser verificado pelo aspecto visual das amostras antes e após exposição em campo de apodrecimento (Figuras 19 a 26).



Figura 19. Aspecto visual das amostras de sumaúma sem tratamento químico (a) antes e (b) após exposição em campo de apodrecimento.



Figura 20. Aspecto visual das amostras de sumaúma tratadas com CCA-C (a) antes e (b) após exposição em campo de apodrecimento.

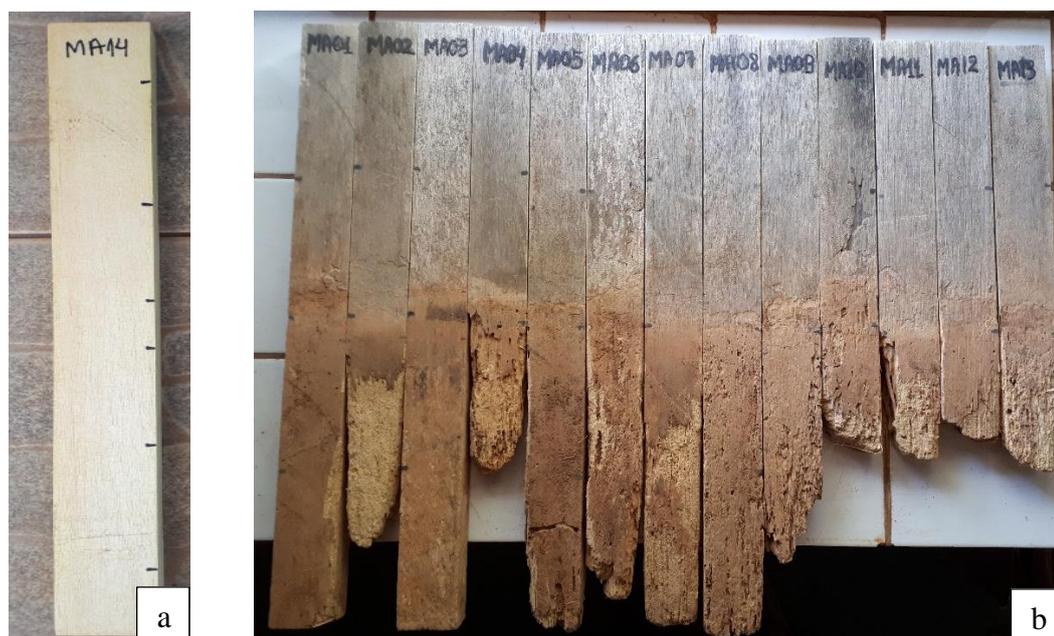


Figura 21. Aspecto visual das amostras de marupá sem tratamento químico (a) antes e (b) após exposição em campo de apodrecimento.

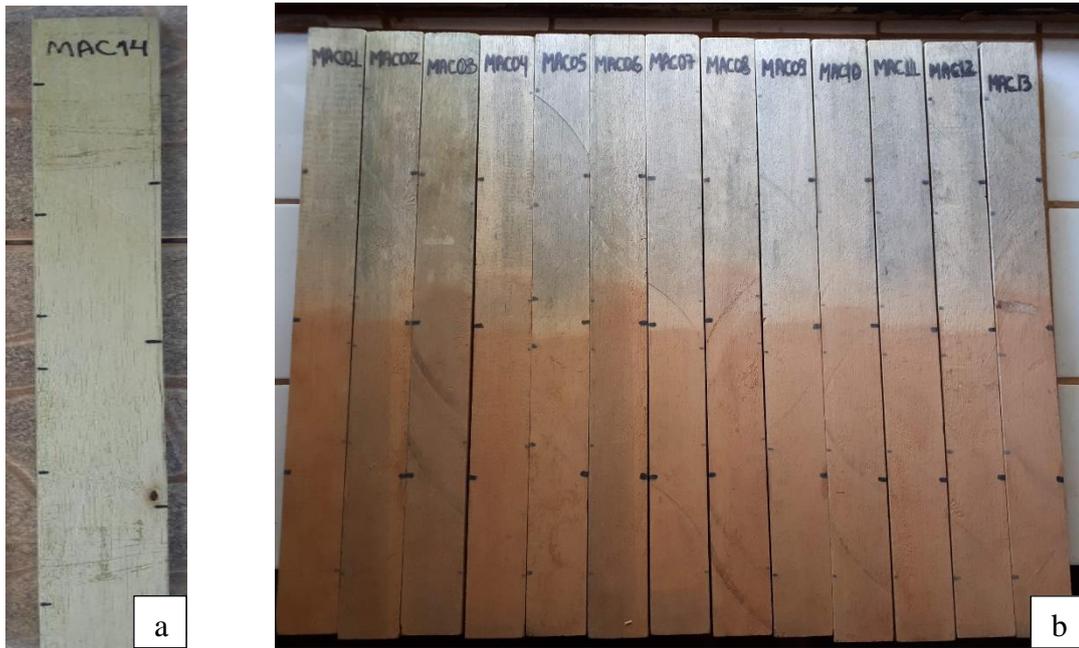


Figura 22. Aspecto visual das amostras de marupá tratadas com CCA-C (a) antes e (b) após exposição em campo de apodrecimento.



Figura 23. Aspecto visual das amostras de curupixá sem tratamento químico (a) antes e (b) após exposição em campo de apodrecimento.



Figura 24. Aspecto visual das amostras de curupixá tratadas com CCA-C (a) antes e (b) após exposição em campo de apodrecimento.



Figura 25. Aspecto visual das amostras de cerejeira sem tratamento químico (a) antes e (b) após exposição em campo de apodrecimento.



Figura 26. Aspecto visual das amostras de cerejeira tratadas com CCA-C (a) antes e (b) após exposição em campo de apodrecimento.

6.3.2 Perda de massa

As Figuras 27 a 30 apresentam as médias de massa observadas em cada período de avaliação para as madeiras de sumaúma, marupá, curupixá e cerejeira, respectivamente. As Tabelas 1 a 4 do Apêndice apresentam os resultados da análise descritiva referente à massa das amostras das quatro espécies de madeiras estudadas sem tratamento e tratadas com CCA-C ao longo do tempo de exposição em campo de apodrecimento.

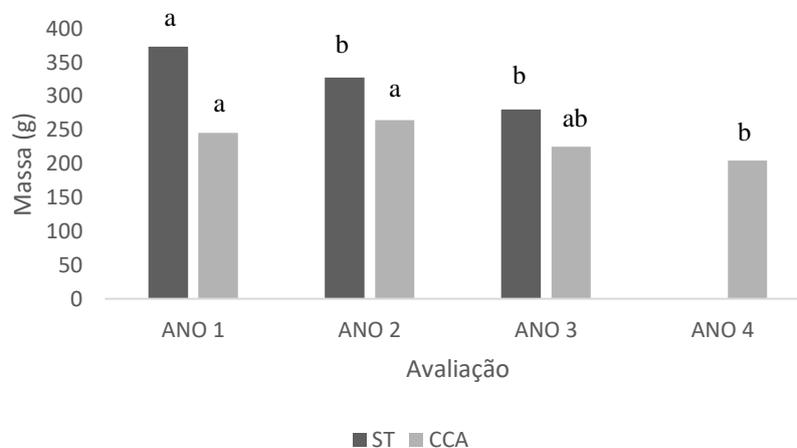


Figura 27. Valores médios de massa das amostras de sumaúma sem tratamento químico (ST) e tratadas com CCA-C ao longo de 40 meses instaladas em campo de apodrecimento.

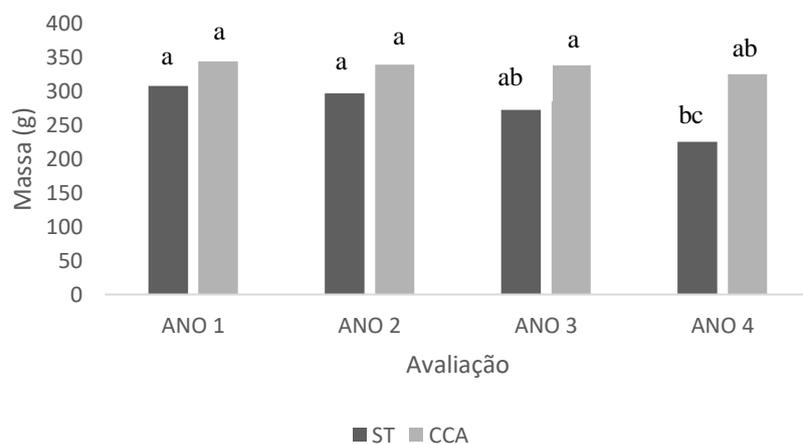


Figura 28. Valores médios de massa das amostras de marupá sem tratamento químico (ST) e tratadas com CCA-C ao longo de 40 meses instaladas em campo de apodrecimento.

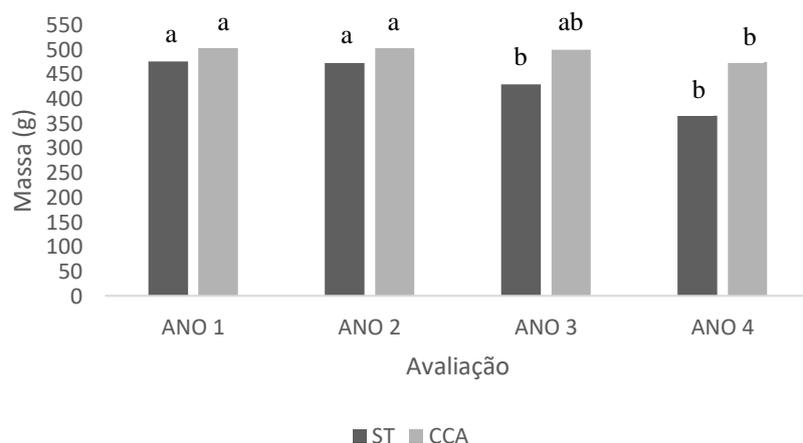


Figura 29. Valores médios de massa das amostras de curupixá sem tratamento químico (ST) e tratadas com CCA-C ao longo de 40 meses instaladas em campo de apodrecimento.

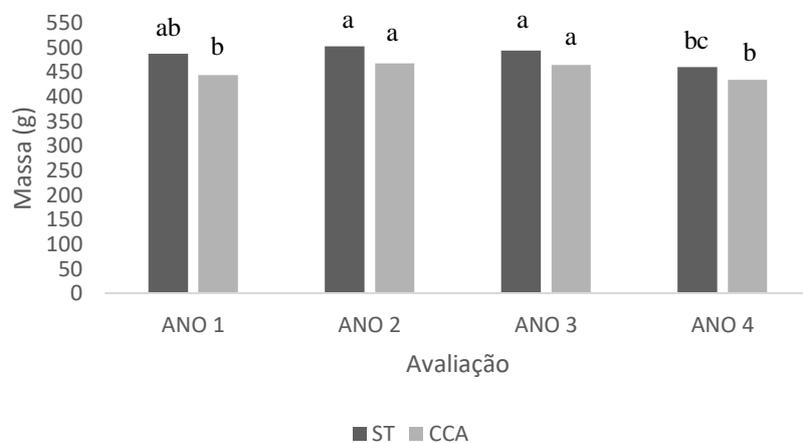


Figura 30. Valores médios de massa das amostras de cerejeira sem tratamento químico (ST) e tratadas com CCA-C ao longo de 40 meses instaladas em campo de apodrecimento.

Para as amostras sem tratamento químico, com exceção da cerejeira, verificou-se um decréscimo acentuado ao longo dos quatro períodos de avaliação, sendo estatisticamente significativo pelo teste de médias de Bonferroni.

Apesar do aumento de massa observado nas estacas tratadas de sumaúma e de cerejeira no segundo ano de avaliação, também foi constatada uma tendência de redução de massa das amostras no decorrer das avaliações, mesmo que em proporções bem menores. Essa variação na massa pode ter ocorrido em razão da absorção de umidade do solo e do ar, pois quando foram alocadas em campo, as amostras encontravam-se com teor de umidade abaixo de 15%; ou por suas células não estarem totalmente impregnadas com CCA-C, pois a penetração deste preservante químico foi apenas parcial e irregular na madeira de sumaúma e superficial na madeira de cerejeira.

As amostras não tratadas de marupá e curupixá apresentaram perdas de massa de 26,61% e 23,23%, respectivamente, após o quarto ano (40 meses) em campo de apodrecimento, enquanto que sumaúma perdeu 24,94% após o terceiro ano de avaliação. A madeira de cerejeira apresentou uma maior resistência natural, com uma variação de massa basicamente em função do teor de umidade do ar e do solo, e com uma redução de apenas 5,55% da massa após os quatro períodos de avaliação.

Salienta-se que, desde o início das avaliações em campo, as amostras de sumaúma e cerejeira tratadas com CCA-C apresentaram uma massa inferior às amostras não tratadas, provavelmente por possuírem maior porção de cerne e teor de umidade mais elevado, uma vez que não foi feita restrição quanto a esses fatores.

Ainda no contexto das amostras tratadas com CCA-C, as estacas de sumaúma, marupá, curupixá e cerejeira apresentaram perdas de massa de 16,48%, 5,57%, 9,24% e 2,31%, respectivamente. Estes baixos valores observados ocorreram em razão da alta eficiência do produto químico na proteção contra os agentes xilófagos.

Teles (2014) também observou tendência semelhante ao avaliar as madeiras de marupá, tauari e cumaru, sem tratamento químico e tratadas com CCA-C, sob condições semelhantes em campo de apodrecimento, corroborando os resultados deste trabalho.

Por fim, a vida útil de uma espécie de madeira é definida por Lopez e Milano (1986) como o tempo necessário para que 50% dos corpos-de-prova de um lote de madeira estejam intensamente atacados ou destruídos. Nesse sentido, a vida útil de

sumaúma não tratada quimicamente foi de aproximadamente 26 meses, com perda de 24,94% de sua massa; e para marupá não tratada foi de 40 meses, após perder 26,61% de massa. Todavia, para curupixá e cerejeira sem tratamento químico e para todas as amostras tratadas com CCA-C, não houve tempo suficiente para determinação da vida útil.

6.4 Avaliação não destrutiva por ultrassom

6.4.1 Velocidade de propagação no sentido transversal

As Figuras 31 a 34 apresentam as velocidades de propagação da onda ultrassônica no sentido transversal, mais especificamente na região de afloramento, para as madeiras de sumaúma, marupá, curupixá e cerejeira sem tratamento químico e tratadas com CCA. A região mediana ou de afloramento foi escolhida em razão da maior acessibilidade de avaliação em caso de aplicação desta metodologia em uma peça estrutural em serviço, se comparada à região soterrada; além desta área sofrer maior deterioração biológica devido à concentração da umidade, quando comparada à região aérea, o que a torna mais limitante para a continuidade do uso da peça.

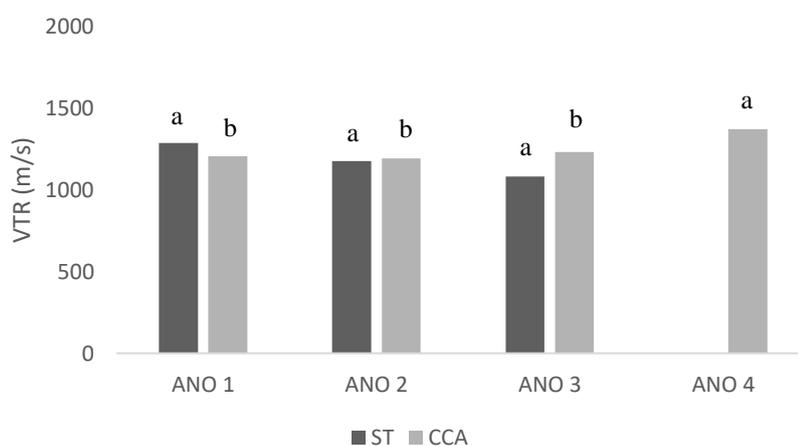


Figura 31. Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no sentido transversal (região de afloramento) para a madeira de sumaúma sem tratamento químico (ST) e tratadas com CCA-C.

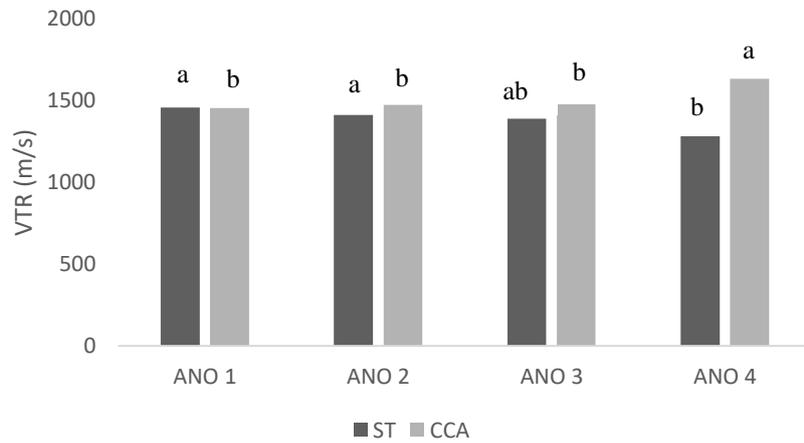


Figura 32. Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no sentido transversal (região de afloramento) para a madeira de marupá sem tratamento químico (ST) e tratadas com CCA-C.

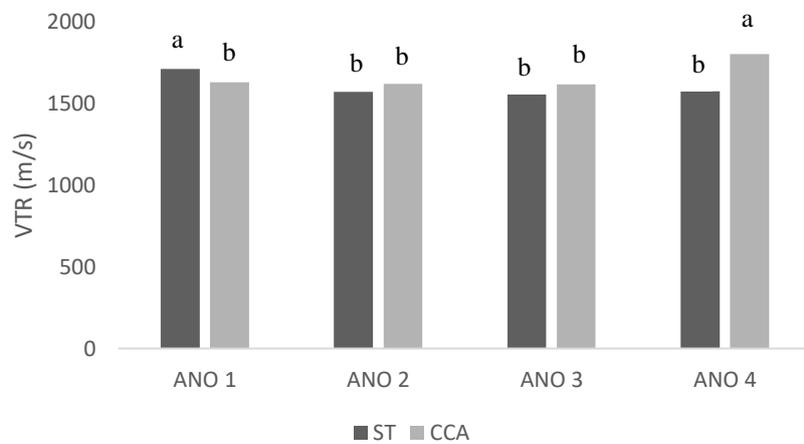


Figura 33. Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no sentido transversal (região de afloramento) para a madeira de curupixá sem tratamento químico (ST) e tratadas com CCA-C.

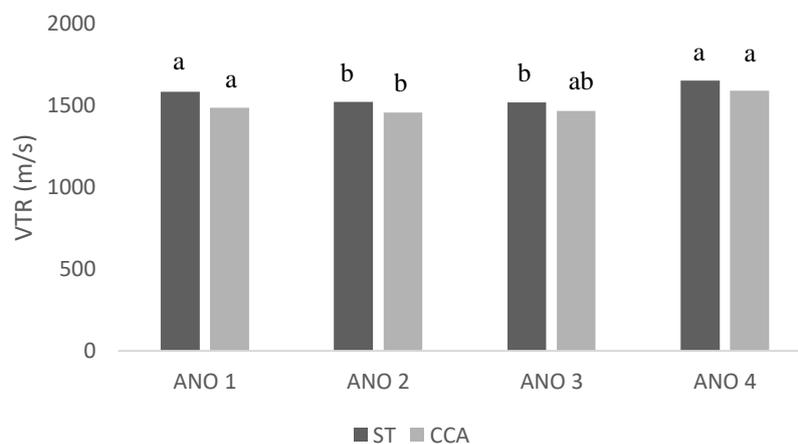


Figura 34. Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no sentido transversal (região de afloramento) para a madeira de cerejeira sem tratamento químico (ST) e tratadas com CCA-C.

As Tabelas 33 a 48 do Apêndice apresentam os resultados da análise não paramétrica pelo teste de Friedman e a comparação múltipla de médias pelo teste de Bonferroni para a velocidade de propagação da onda ultrassônica em madeiras sem tratamento e tratadas com CCA-C em função do período de avaliação em campo de apodrecimento.

Para as amostras sem tratamento, foi observada uma tendência de decréscimo da velocidade de propagação da onda ultrassônica ao longo do tempo de exposição às intempéries e à ação dos fungos apodrecedores e térmitas. O elevado nível de deterioração nas amostras de sumaúma não permitiu a avaliação no quarto ano, pois nesse período todas as amostras que se encontravam no campo quebraram durante a sua retirada do solo. Através do teste de médias, foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os quatro anos de avaliação para todas as espécies de madeira, com exceção de sumaúma sem tratamento.

Isto pode ser justificado pelo curso do processo de biodeterioração, em que a descompactação da madeira dificulta a obtenção do tempo de propagação da onda pelo material, principalmente em razão do acoplamento deficiente do transdutor à superfície irregular, fato este também observado por Teles (2014).

Ademais, uma peça de madeira deteriorada apresenta muitos espaços vazios, os quais devem ser contornados pelas ondas ultrassônicas, fazendo com que estas levem mais tempo para serem detectadas pelo transdutor receptor, causando a redução da

velocidade de propagação das ondas na madeira. Oliveira (2005) associa essa atenuação à não homogeneidade estrutural da madeira, sendo um parâmetro sensível às condições higroscópicas e que implica na estimativa da porosidade do material. Johnstone et al. (2010) também reforçaram esta relação inversamente proporcional, no sentido de que quanto mais deterioradas estão as paredes das células, mais lento é o movimento do sinal ultrassônico.

Bütler et al. (2007), ao avaliarem a deterioração de toras de abeto da Noruega (*Picea abies*), atribuíram a atenuação da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas à textura macia e esponjosa adquirida pela madeira em decorrência do apodrecimento, conforme demonstrado na Figura 35. Além disso, estes autores também observaram que a velocidade da onda ultrassônica está diretamente relacionada à densidade média da madeira, o que também foi atestado por Oliveira e Sales (2006).



Figura 35. Aspecto esponjoso adquirido pela madeira de marupá devido ao processo de biodeterioração.

As amostras de cerejeira sem tratamento apresentaram relativa estabilidade na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas ao longo das avaliações, o que pode ser justificado pelo menor nível de deterioração das mesmas em campo, em razão de sua maior resistência natural, a qual é influenciada pela massa específica bem como pelo alto teor de extrativos (SYOFUNA et al., 2012).

Ressalta-se que, a concentração de extrativos também pode variar dentro de uma espécie, e até dentro de uma mesma árvore, o que justifica a maior inibição do ataque de organismos xilófagos observado para esta espécie em relação ao resultado de IPEF e IPT

(s.d.), os quais consideram esta espécie como pouco resistente ao ataque de fungos e cupins xilófagos.

Teles (2014) observou comportamento similar ao obtido no presente estudo para a madeira de cumaru, em campo de apodrecimento no cerrado, devido à alta massa específica ($0,82 \text{ g/cm}^3$) apresentada por esta espécie.

Para as amostras de madeiras tratadas com CCA-C, logo após a impregnação, foi observada uma redução significativa da velocidade de propagação da onda ultrassônica, em ambos os sentidos para as madeiras de marupá, curupixá e cerejeira; enquanto que a madeira de sumaúma apresentou redução significativa apenas no sentido longitudinal (Figuras 36 e 37).

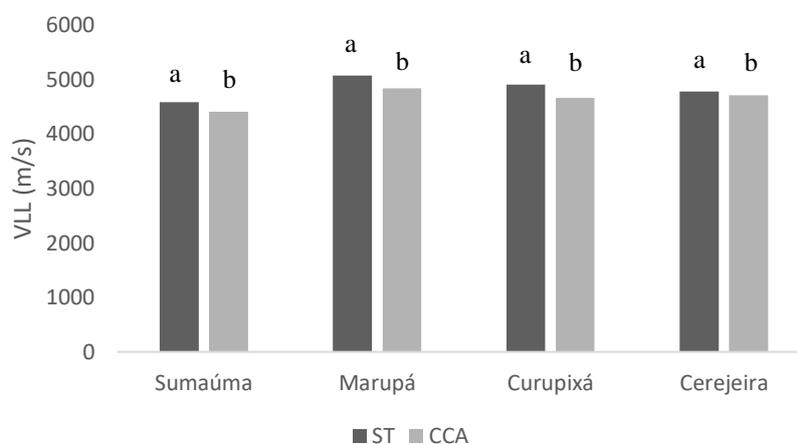


Figura 36. Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no sentido longitudinal para as madeiras de sumaúma, marupá, curupixá e cerejeira sem tratamento químico (ST) e após tratamento com CCA-C.

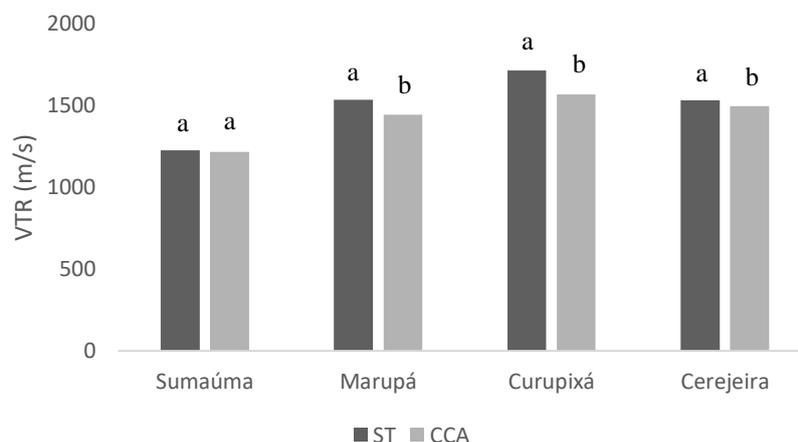


Figura 37. Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no sentido transversal para as madeiras de sumaúma, marupá, curupixá e cerejeira sem tratamento químico (ST) e após tratamento com CCA-C.

Esta redução ocorreu, segundo Silva (2007), porque ao impregnar a madeira com CCA-C, o cromo provoca reação de precipitação de grande quantidade de cobre e arsênio e reage com a madeira, tornando os produtos praticamente insolúveis. Ademais, esta reação de fixação desencadeada pelo cromo deixa o arsênio e o cobre totalmente aderidos às paredes celulares, o que pode provocar a atenuação da velocidade de propagação da onda ultrassônica.

Durante os três primeiros anos de avaliações, a velocidade das ondas ultrassônicas manteve-se estável nas amostras tratadas com CCA-C, sem variações significativas (Figuras 31 a 34). No entanto, no quarto ano de avaliação, foi observado um aumento significativo, detectado pelo teste de comparação de médias de Bonferroni.

Este aumento pode estar relacionado com os efeitos do clima na época para a região onde o campo de apodrecimento está localizado, uma vez que o teor de umidade das amostras no último período de avaliação foi o menor observado, sendo abaixo de 12%. Respalhando os resultados obtidos neste trabalho, Oliveira e Sales (2005) observaram valores máximos de velocidade com uma mínima atenuação na propagação das ondas ultrassônicas para madeira com baixo teor de umidade; enquanto que, segundo Oliveira (2005), o inverso resulta numa diminuição da velocidade nas direções longitudinal, radial e tangencial.

6.5 Avaliação não destrutiva por espectroscopia no infravermelho próximo

A Figura 38 apresenta os espectros NIR das amostras sadias e sem tratamento de sumaúma, marupá, curupixá e cerejeira sem pré-processamento e após o pré-processamento de padronização normal de sinal (SNV), respectivamente. Segundo Schwanninger et al. (2011), este procedimento é necessário para o aprimoramento da resolução dos espectros, além de possibilitar a localização dos valores máximos das bandas de absorção para posterior atribuição da banda, uma vez que a interpretação visual, por si só, é prejudicada em razão da amplitude e sobreposição das bandas.

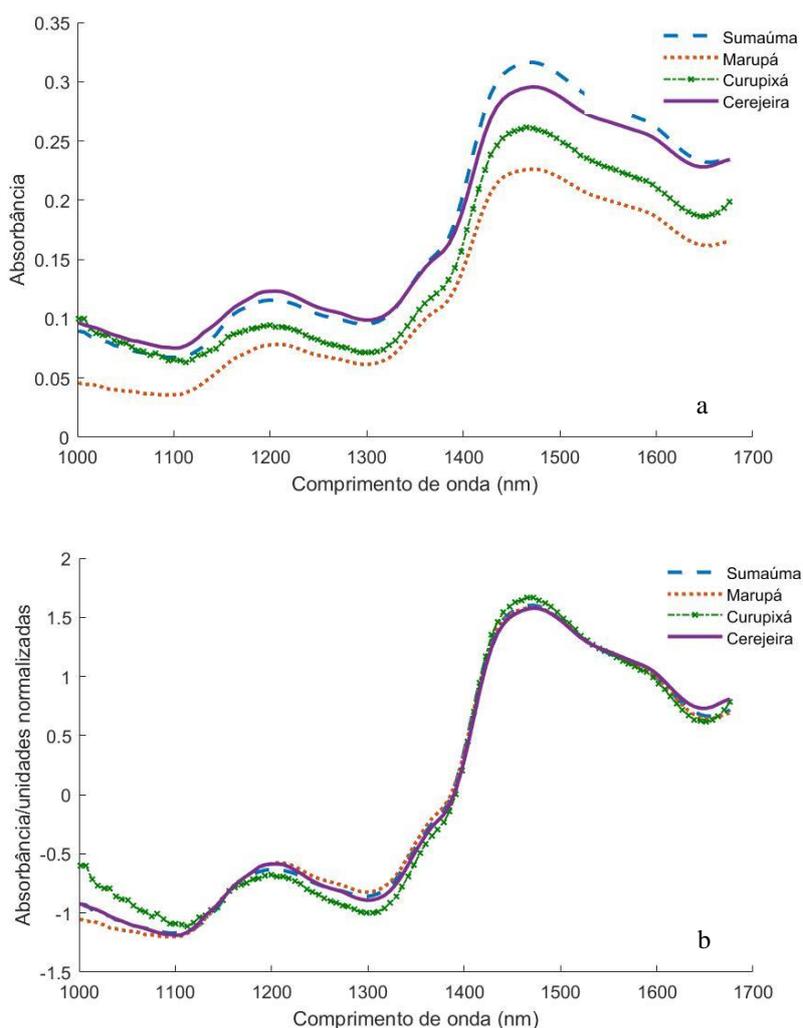


Figura 38. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras sadias e sem tratamento químico de sumaúma, marupá, curupixá e cerejeira (a) sem pré-processamento; e (b) após o pré-processamento de padronização normal de sinal.

Os espectros na região do infravermelho próximo são ricos em informação, e quando obtidos a partir de um material tão complexo como a madeira, tais informações tornam-se “impressões digitais” de cada espécie, o que permite o monitoramento quando submetida a condições adversas, como ataques de organismos xilófagos.

Nesse sentido, e com fundamento nas contribuições de Schwanninger et al. (2011), Soares et al. (2017) e Silva (2018), foram analisadas bandas referentes aos principais componentes químicos da madeira obtidas com o MicroNIRTM, as quais estão indicadas na Tabela 10.

Tabela 10. Bandas referentes aos principais componentes químicos da madeira obtidas com MicroNIRTM (SCHWANNINGER et al., 2011; SOARES et al., 2017; SILVA, 2018).

Banda	Comprimento de onda (nm)	Número de onda (cm ⁻¹)	Componente químico
1	1.100 a 1.200	9.091 a 8.333	2° sobretom do estiramento assimétrico das ligações C–H e HC=CH das moléculas de lignina; 2° sobretom do estiramento da ligação C–H das moléculas celulose e hemicelulose
2	1.350 a 1.380	7.407 a 7.246	1° sobretom do estiramento e deformação angular da ligação C–H das moléculas celulose e hemicelulose
3	1.390 a 1.450	7.194 a 6.897	1° sobretom do estiramento da ligação O–H das hidroxilas fenólicas (extrativos), celulose, hemicelulose e água.

A evolução do processo de biodeterioração das amostras de sumaúma, marupá, curupixá e cerejeira, sem tratamento químico e tratadas com CCA-C, ao longo dos períodos de avaliação pode ser observada nas Figuras 39 a 46.

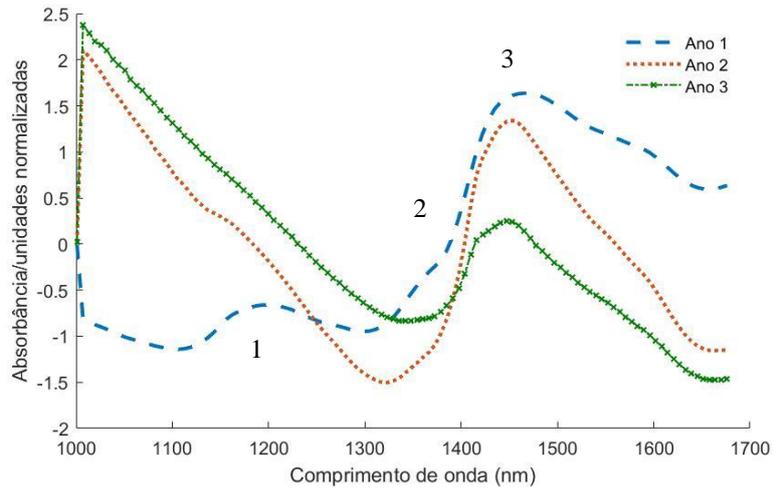


Figura 39. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de sumaúma sem tratamento químico em cada período de avaliação em campo de apodrecimento.

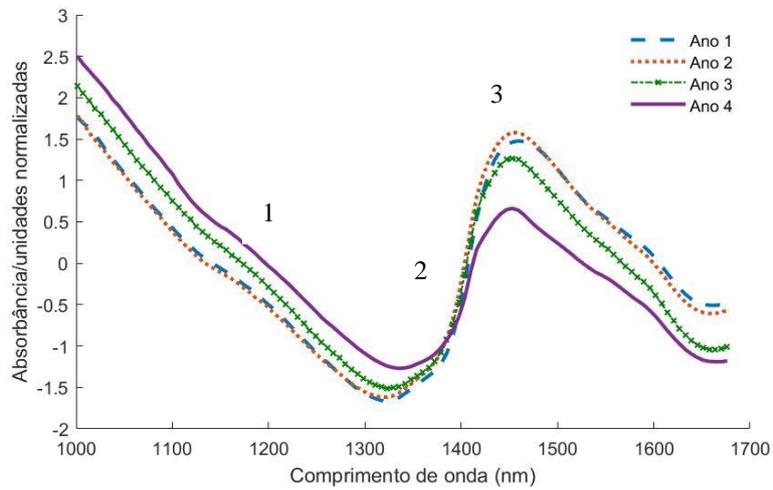


Figura 40. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de sumaúma tratadas com CCA-C em cada período de avaliação em campo de apodrecimento.

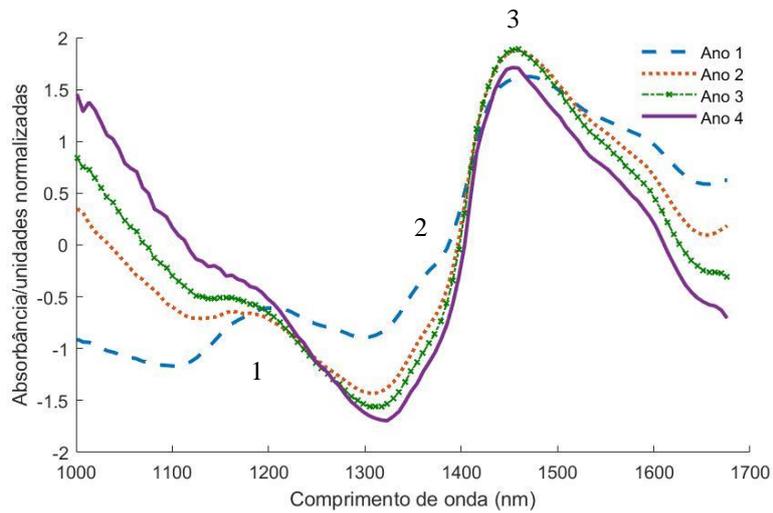


Figura 41. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de marupá sem tratamento químico em cada período de avaliação em campo de apodrecimento.

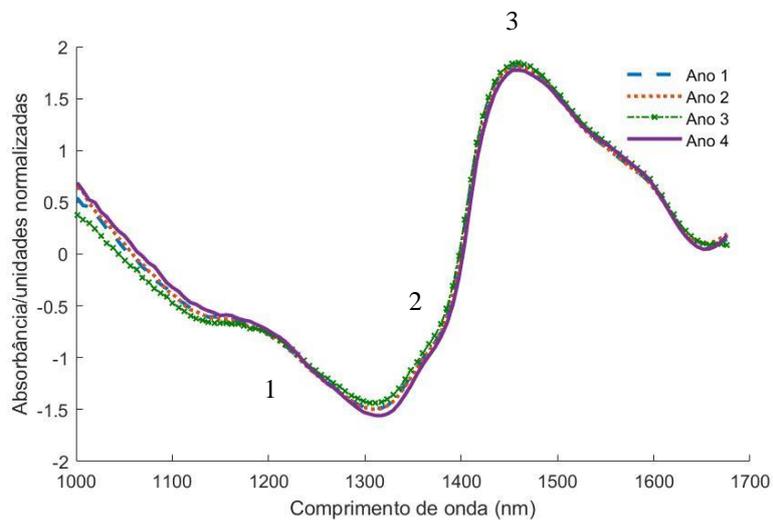


Figura 42. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de marupá tratadas com CCA-C em cada período de avaliação em campo de apodrecimento.

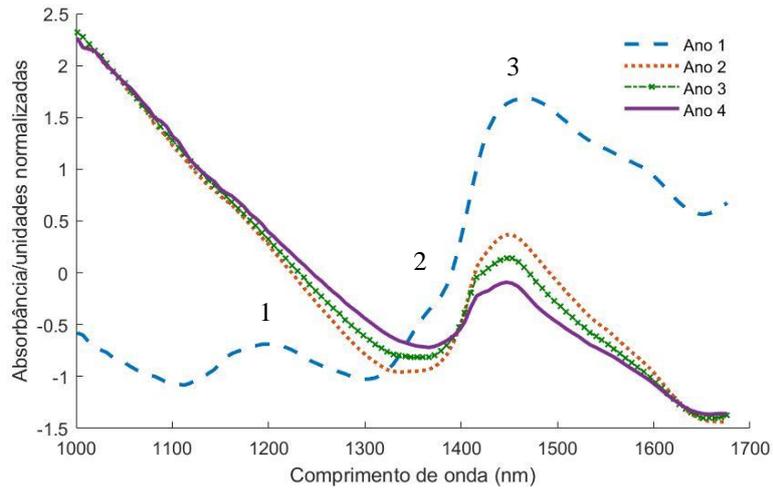


Figura 43. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de curupixá sem tratamento químico em cada período de avaliação em campo de apodrecimento.

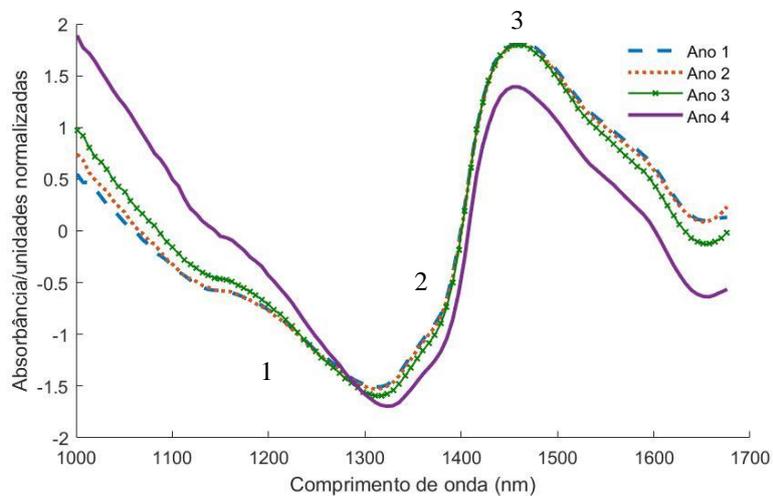


Figura 44. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de curupixá tratadas com CCA-C em cada período de avaliação em campo de apodrecimento.

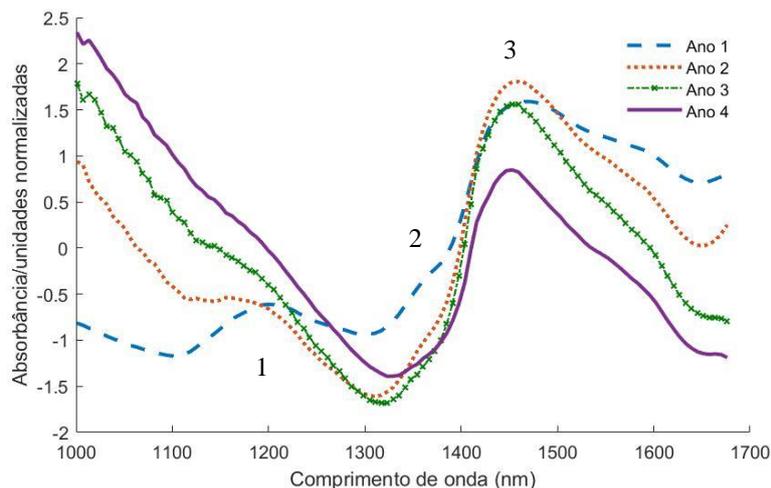


Figura 45. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de cerejeira sem tratamento químico em cada período de avaliação em campo de apodrecimento.

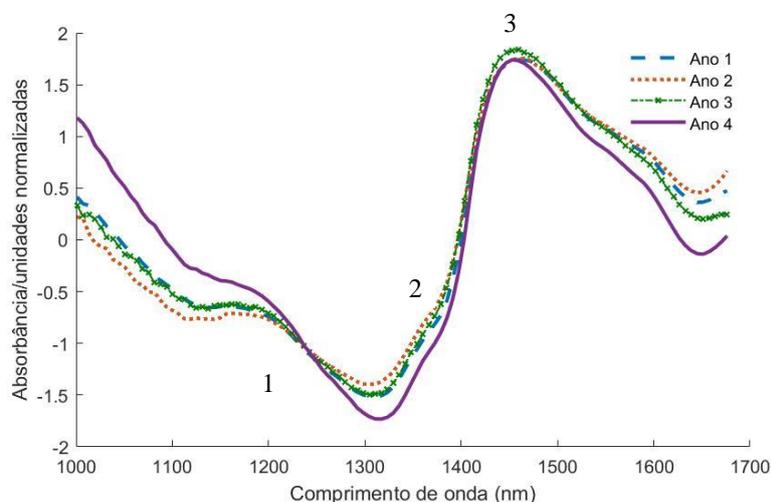


Figura 46. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de cerejeira tratadas com CCA-C em cada período de avaliação em campo de apodrecimento.

Verificou-se que, para todas as espécies, os espectros NIR das amostras tratadas com CCA-C mantiveram o padrão do formato inicial das bandas, apenas com alterações nas intensidades, após 4 períodos de avaliação. Isto ratifica o grau de proteção conferido à madeira pelo produto químico preservante, o qual é altamente tóxico a fungos e insetos xilófagos.

No que diz respeito às amostras não tratadas, seus espectros foram visivelmente mais alterados, apresentando bandas mais deformadas e com menores intensidades espectrais se comparadas ao ano 1.

Ao analisar especificamente a banda 2, referente ao 1º sobretom do estiramento e deformação angular da ligação C–H das moléculas celulose e hemicelulose, observou-se que esta sofreu maior deterioração. Isto se deve ao fato desses carboidratos serem amplamente metabolizados por fungos apodrecedores e por térmitas, o que provoca a perda de massa e, conseqüentemente, a redução da densidade do material.

Sandak et al. (2013) também constataram mudanças significativas na banda atribuída ao estiramento de O–H e à região de deformações de C–H em celulose (4890 - 4620 cm^{-1}), indicando que mesmo em estágio inicial de deterioração, as alterações na estrutura da parede celular da madeira podem levar a um rápido declínio das propriedades de resistência.

No tocante à banda 1, que está relacionada a lignina e a polissacarídeos, o aumento na intensidade de absorbância verificado na maioria dos espectros NIR não implica necessariamente em aumento dos compostos químicos a ela relacionados, pois durante o processo de deterioração do material biológico, compostos químicos são metabolizados ou consumidos enquanto outros são criados. No caso, como a celulose (banda 2) foi severamente deteriorada, pode ser um indicativo de que a proporção dos demais componentes químicos passou a ser maior em relação àquele componente.

Fackler et al. (2007), ao avaliarem espectros das madeiras deterioradas de abeto e faia após exposição a fungos de podridão branca e parda, observaram significativa redução na região espectral entre 8700 e 6900 cm^{-1} , que inclui bandas sobrepostas também relacionadas a lignina e polissacarídeos, ou seja, o comportamento espectral foi distinto do encontrado neste trabalho.

Entretanto, Soares et al. (2017) salientam que diversos fatores impactam na variabilidade dos espectros NIR, tais como as medidas serem tomadas em campo, em madeira sólida e com teor de umidade variado, com variabilidade amostral significativamente maior, além do uso de equipamento portátil com menor resolução e sensibilidade. Somado a isso, deve-se levar em consideração as condições adversas de exposição a fungos e insetos xilófagos, ao intemperismo e a múltiplas condições

climáticas, que contribuem para o aumento da rugosidade da madeira analisada e, conseqüentemente, dificultam a obtenção de um espectro mais nítido.

Cabe ressaltar que os organismos xilófagos envolvidos no processo de biodeterioração possuem preferências ou limitações alimentares, inclusive relacionadas à região cristalina ou amorfa, o que resulta em intensidades de decomposição diversas.

De modo mais claro, fungos de podridão parda atacam principalmente celulose e hemicelulose, deixando para trás uma lignina modificada, ao passo que fungos de podridão branca desenvolveram sistemas enzimáticos capazes de deteriorar todos os três principais componentes químicos da madeira. Highley (1988) ainda aprofundou tais especificidades ao demonstrar a eficiência do fungo de podridão parda *Coniphora puteana* em deteriorar ambos os tipos de celulose, ou seja, a parte cristalina (estiramento da ligação O-H em 6287 cm^{-1}) e a amorfa (estiramento da ligação O-H em 7008 cm^{-1}).

Ainda nesta perspectiva, Arantes e Milagres (2009) citam que as velocidades relativas de decomposição da lignina e dos polissacarídeos variam grandemente de acordo com a espécie fúngica, o que no caso deste estudo, combinado com a ação de térmitas e com a disposição aleatória das amostras no solo, acentuou o grau de variabilidade de biodeterioração observada.

A banda 3, apesar de ser bastante heterogênea, está relacionada também à água (1440 nm), importante componente na dinâmica do processo de biodeterioração da madeira. Para Schwanninger et al. (2011), a água livre e adsorvida influencia nos espectros NIR obtidos, sendo que a absorção aumenta conforme aumenta o comprimento de onda e o teor de água. Portanto, esta banda pode ser utilizada como parâmetro para monitoramento do teor de umidade da madeira, com a ressalva de que sua localização pode ser alterada em função da temperatura.

Nesse sentido, as madeiras de sumaúma e curupixá não tratadas sofreram redução de 32% e 53% no teor de umidade, respectivamente, o que pode justificar as significativas alterações na banda 3 de seus espectros.

Por fim, as Figuras 47 a 50 apresentam os espectros das amostras tratadas e não tratadas, antes e após o período de avaliação em campo de apodrecimento, e reafirmam eficácia da proteção fornecida à madeira pelo preservante CCA-C, o qual apresenta excelente desempenho em campo em razão de seus efeitos fungicida e inseticida, além da

baixa lixiviação. Ademais, explicitam a magnitude das alterações sofridas nas amostras sem tratamento químico, principalmente no que se refere à banda 2, relativa à celulose e hemiceluloses.

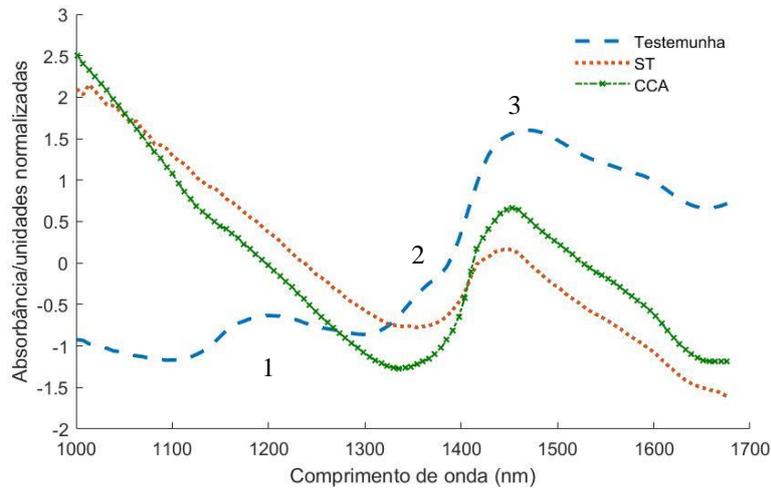


Figura 47. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de sumaúma antes (testemunha) e após três períodos de avaliação em campo (sem tratamento – ST e tratadas com CCA-C).

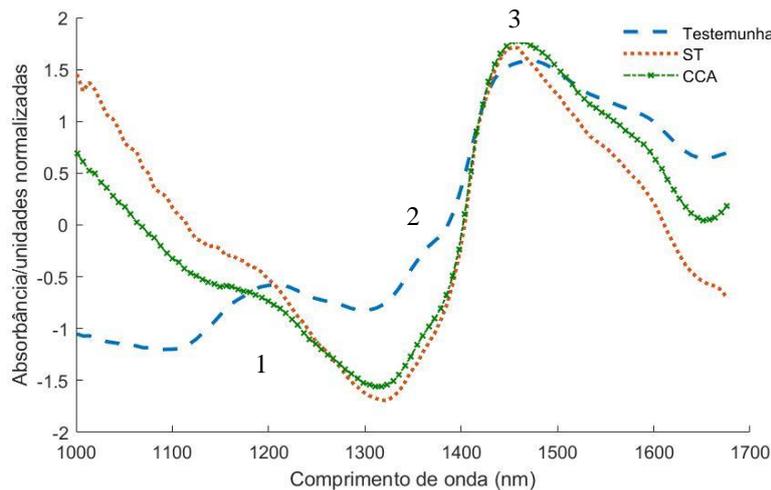


Figura 48. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de marupá antes (testemunha) e após quatro períodos de avaliação em campo (sem tratamento – ST e tratadas com CCA-C).

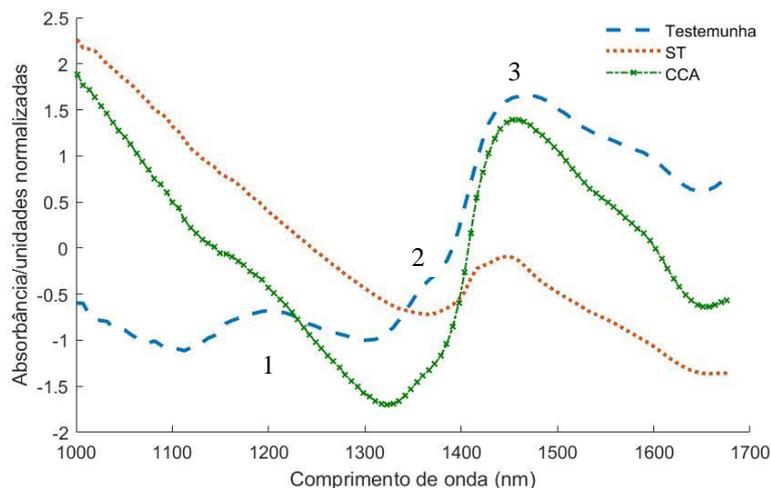


Figura 49. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de curupixá antes (testemunha) e após quatro períodos de avaliação em campo (sem tratamento – ST e tratadas com CCA-C).

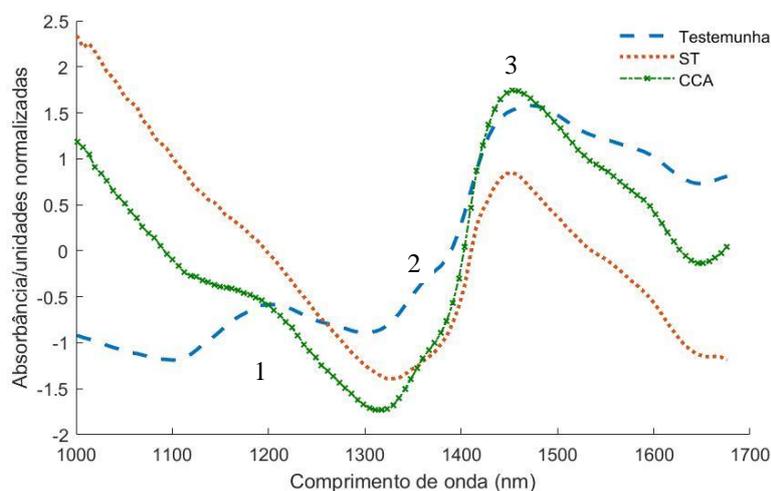


Figura 50. Espectros de infravermelho próximo (NIR) das amostras de cerejeira antes (testemunha) e após quatro períodos de avaliação em campo (sem tratamento – ST e tratadas com CCA-C).

6.6 Predição da vida útil por redes neurais artificiais

Em razão da madeira de sumaúma ter sofrido severa biodeterioração em um curto período de tempo e da madeira de cerejeira ter apresentado perda de massa apenas no último ano de avaliação, o que tornou o fornecimento de dados insuficiente para alimentação das redes neurais artificiais para essas duas espécies, optou-se por realizar a modelagem de predição da vida útil apenas com as madeiras de marupá e curupixá.

Outro ponto a ser destacado é que no primeiro ano de avaliação das estacas em campo não ocorreu perda de massa, em virtude da absorção de umidade do solo. A entrada de perda de massa igual a zero na rede neural artificial poderia causar incongruência e erros nos resultados preditos, razão pela qual os dados do primeiro ano foram retirados da base de dados do treinamento. Logo, os resultados aqui expostos nos períodos 1, 2 e 3 referem-se aos anos 2, 3 e 4 de avaliação em campo.

A Tabela 11 apresenta os resultados das estatísticas de precisão obtidos para as cinco redes neurais de melhor desempenho, dentre as 100 treinadas para predição da perda de massa (PM%) em função da velocidade de propagação ultrassônica.

Tabela 11. Características e estatísticas de precisão das redes neurais artificiais, do tipo MLP, selecionadas para predição da perda de massa em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica.

RNA	Arquitetura	Nº de ciclos	Função de ativação		Ajuste		Validação	
			Camada oculta	Camada de saída	RMSE (%)	r	RMSE (%)	r
1	8-17-1	448	Identidade	Logística	24,15	0,96	37,76	0,87
2	8-15-1	680	Tangente	Sigmoidal	15,75	0,98	30,18	0,91
3	8-18-1	11950	Exponencial	Exponencial	23,56	0,95	36,45	0,88
4	8-13-1	630	Sigmoidal	Sigmoidal	18,55	0,97	33,56	0,89
5	8-17-1	710	Sigmoidal	Seno	16,56	0,98	31,35	0,90

Em que: RNA = redes neurais artificiais; MLP = *Multilayer perceptron* (Perceptron multicamadas); RMSE = *Root-Mean-Square Error* (Raiz do erro quadrático médio); r = correlação entre os valores observados e estimados.

Os valores de correlação obtidos para todas as redes treinadas, indicam uma boa precisão entre os dados observados e estimados da variável de saída. Ademais, os valores moderados de raiz quadrada do erro médio (RMSE%) do ajuste abaixo de 25%, corroboram a eficiência da metodologia para o caso em análise, considerando a grande variabilidade dos fatores biológicos agregados ao processo de biodeterioração da madeira, além do número limitado de amostras em campo de apodrecimento.

No entanto, é necessário que a rede aplicada aos dados não incluídos no ajuste também apresente boas estatísticas, expressando, assim, seu poder de generalização. E nesse contexto, a RNA 2 demonstrou a melhor capacidade de predição em relação às demais, uma vez que apresentou os maiores valores de correlação (0,98 e 0,91); e os menores valores de RMSE% (15,75% e 30,18%), para o treinamento e para a validação.

A RNA2, do tipo multicamada (MLP), é composta por oito neurônios em sua camada de entrada; sua camada oculta é formada por quinze neurônios e ativada por uma função tangente; e sua camada de saída, composta por um neurônio, é ativada por uma função sigmoideal (Figura 51). Este tipo de rede possui como importante característica a não linearidade das saídas dos neurônios, o que possibilitou modelar com significativa precisão o comportamento não linear verificado em campo de apodrecimento, em razão das características intrínsecas à madeira, das condições climáticas e do processo de biodeterioração.

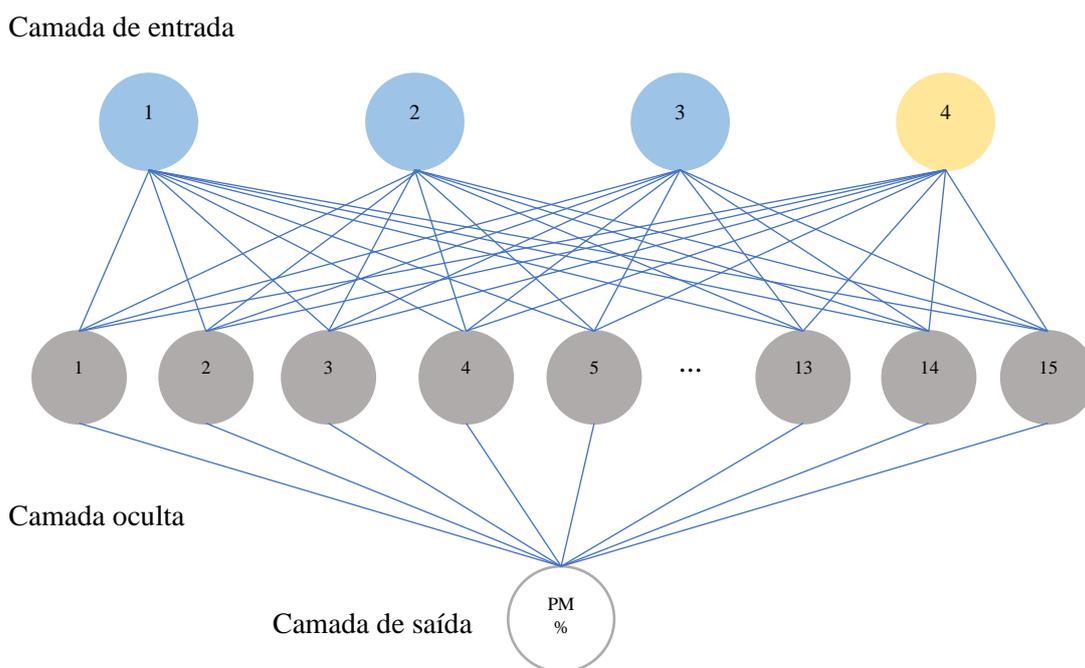


Figura 51. Arquitetura da RNA2 selecionada para predição de perda de massa. Em que: Na camada de entrada – 1, 2, 3 (variáveis categóricas – espécie de madeira, tratamento químico e período de avaliação) e 4 (variável contínua – ultrassom); Na camada oculta – 1 a 15 (números de neurônios); Na camada de saída – PM% (perda de massa predita).

Para Miguel et al. (2015), apesar das estatísticas de ajuste serem boas indicadores para a seleção do modelo, a análise gráfica de resíduos é fundamental, pois deve-se considerar que erros de tendência podem ocorrer em determinada amplitude da variável de interesse e não serem detectados pelas demais estatísticas. Portanto, ao avaliar a distribuição de resíduos e a estimativa da variável de interesse observou-se que não apresentaram tendenciosidade e a maior concentração de erros restringiu-se à perda de

massa inferior a 5% (Figuras 52 e 53), ou seja, não influencia, em termos práticos, na determinação da vida útil da madeira.

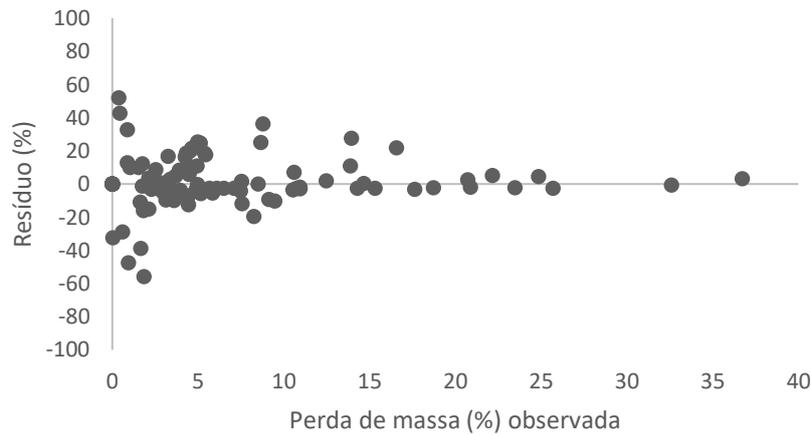


Figura 52. Dispersão dos resíduos percentuais em relação aos valores observados de perda de massa (%) no treinamento da RNA2 em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica.

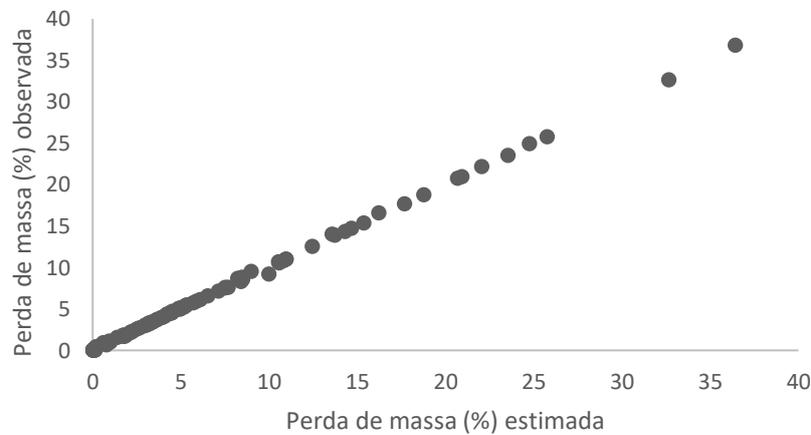


Figura 53. Relação entre a perda de massa observada e estimada no treinamento da RNA2 em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica.

Além disso, a análise estatística por meio do teste *t de Student* apresentou valor de p maior que $\alpha = 0,05$ ($p = 0,23$), indicando que não existem diferenças significativas entre as estimativas de perda de massa realizadas pela rede neural artificial e a perda de massa observada, o que ratificou a eficácia da metodologia proposta.

Teles (2014), por meio de análise de regressão, obteve resultados satisfatórios para estimativa da vida útil da madeira de marupá sem tratamento químico, em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica e do período de avaliação do campo de

apodrecimento. No entanto, para aplicação de modelos clássicos de regressão há a necessidade do comportamento a ser modelado apresentar normalidade e linearidade, pressupostos estes que não são exigidos pelas redes neurais artificiais, além da possibilidade de inclusão de variáveis qualitativas, tornando esta metodologia mais vantajosa em relação àquela (EGRIOGLU et al., 2014; MARTINS et al., 2016).

Com relação às redes treinadas em função da intensidade de absorbância no infravermelho próximo, especificamente na banda referente à celulose, as estatísticas de precisão também apresentaram resultados satisfatórios, considerando a complexidade da variável a ser predita, com valores de correlação entre a variável de interesse observada e a estimada pelo modelo acima de 0,95; além de RMSE% abaixo de 25% (Tabela 12).

Destaca-se que, no espectro de infravermelho próximo foi escolhida a banda referente à celulose, situada na faixa de 1.350 a 1.380 nm, para compor a base de dados (SILVA, 2018). Esta escolha se deu em razão deste componente químico ser o principal constituinte químico da madeira, além de ser metabolizado pelas mais diversas espécies de fungos e cupins.

Tabela 12. Características e estatísticas de precisão das redes neurais artificiais, do tipo MLP, selecionadas para predição da perda de massa em função dos espectros de infravermelho próximo.

RNA	Arquitetura	Nº de ciclos	Função de ativação		Ajuste		Validação	
			Camada oculta	Camada de saída	RMSE (%)	r	RMSE (%)	r
1	8-16-1	630	Sigmoidal	Seno	22,15	0,95	35,45	0,88
2	8-17-1	348	Identidade	Logística	20,15	0,96	33,75	0,90
3	8-18-1	11500	Exponencial	Exponencial	19,45	0,97	32,65	0,90
4	8-9-1	567	Sigmoidal	Sigmoidal	18,55	0,97	31,05	0,91
5	8-17-1	418	Tangente	Sigmoidal	14,45	0,98	27,35	0,93

Em que: RNA = redes neurais artificiais; MLP = *Multilayer perceptron* (Perceptron multicamadas); RMSE = *Root-Mean-Square Error* (Raiz do erro quadrático médio); r = correlação entre os valores observados e estimados.

Porém, como citado anteriormente, é necessária a avaliação das estatísticas referentes à aplicação da rede a dados inéditos (generalização). Por meio desta, verificou-se que a RNA 5 apresentou melhor precisão para predição da perda de massa decorrente do ataque de organismos xilófagos, posto que foram observados menores valores de RMSE%, tanto para o treinamento (14,45%) quanto para a generalização (27,35%),

quando comparados aos obtidos para as redes treinadas com ultrassom, além de uma menor quantidade de ciclos.

Martins et al. (2016) ressaltam a importância da definição da quantidade de ciclos para o treinamento, pois está diretamente relacionada com a possibilidade de ocorrência de *underfitting* ou de *overfitting*. Este pode ocasionar a memorização dos dados de treinamento e baixa capacidade de generalização, devido ao excesso de ciclos; e aquele pode resultar em um treinamento insuficiente para o processo de aprendizagem (BULLINARIA, 2016).

O melhor ajuste observado com os dados espectrais pode ter ocorrido em razão da maior quantidade de dados fornecidos à rede, pois um espectro é composto de inúmeros valores de intensidade de absorbância em diversos comprimentos de onda, enquanto que na avaliação por ondas ultrassônicas é obtido um único valor de velocidade de propagação para cada ponto analisado.

A RNA5 apresenta em sua configuração uma camada de entrada com oito neurônios; uma camada oculta com dezessete neurônios, ativada por uma função tangente; e uma camada de saída com um neurônio sendo ativada por uma função sigmoideal (Figura 54).

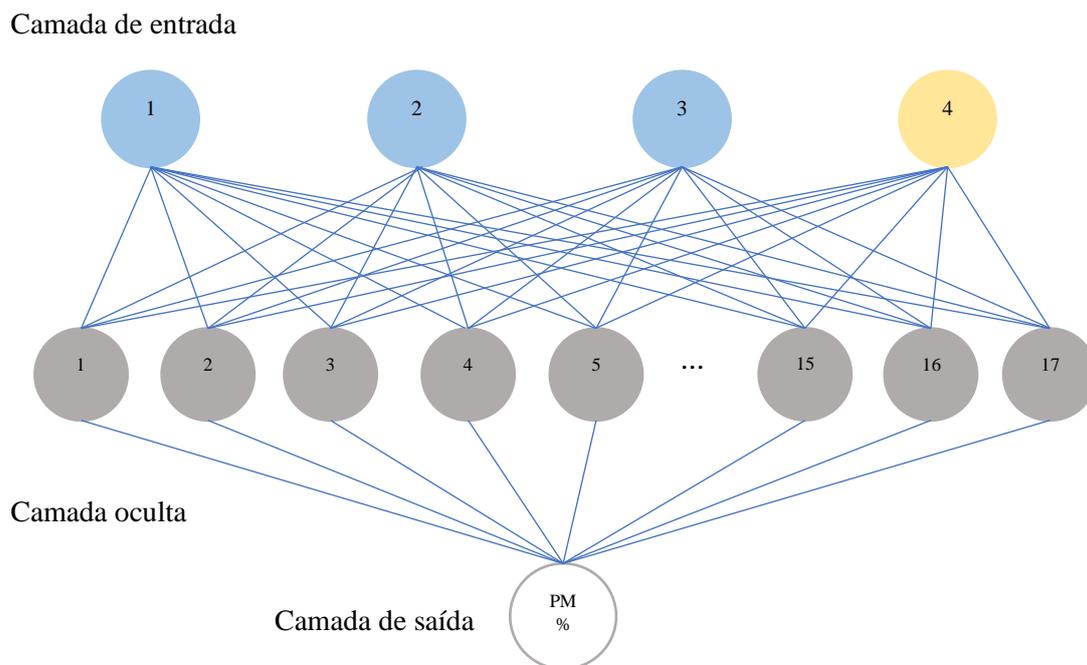


Figura 54. Arquitetura da RNA5 selecionada para predição de perda de massa. Em que: Na camada de entrada – 1, 2 3 (variáveis categóricas – espécie de madeira, tratamento químico e período de avaliação) e 4 (variável contínua – NIR); Na camada oculta – 1 a 17 (números de neurônios); Na camada de saída – PM% (perda de massa predita).

Conforme observado na Figura 55, a distribuição dos erros apresentou-se mais uniforme em praticamente todas as faixas de perda de massa, quando comparada à rede treinada com dados de ultrassom. Ademais, a variável de saída perda de massa apresentou estimativas satisfatórias com o uso das redes neurais, com valores próximos à linha 1:1, o que também indicou a alta precisão da rede treinada (Figura 56).

O resultado do teste *t de Student*, cujo valor de p foi maior que $\alpha = 0,05$ ($p = 0,13$), também mostrou que não existem diferenças significativas entre a perda de massa observada e a predita pela rede selecionada, reiterando a aplicabilidade das redes neurais artificiais para predição de perda de massa utilizando-se espectroscopia de infravermelho próximo como variável preditora.

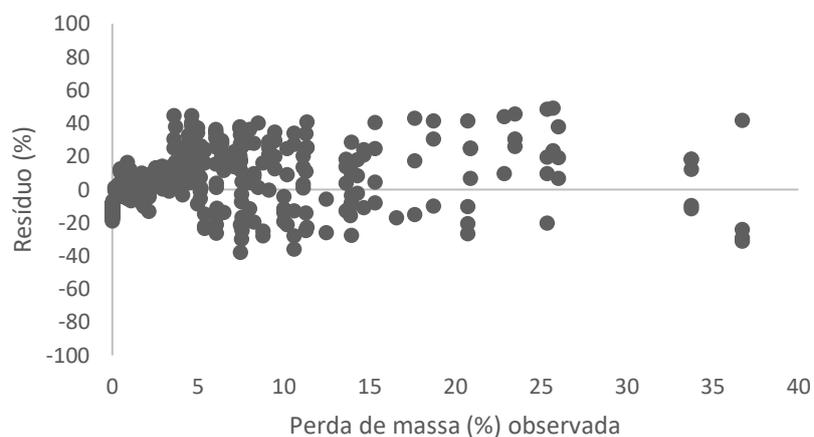


Figura 55. Dispersão dos resíduos percentuais em relação aos valores observados de perda de massa (%) no treinamento da RNA5 em função dos espectros de infravermelho próximo.

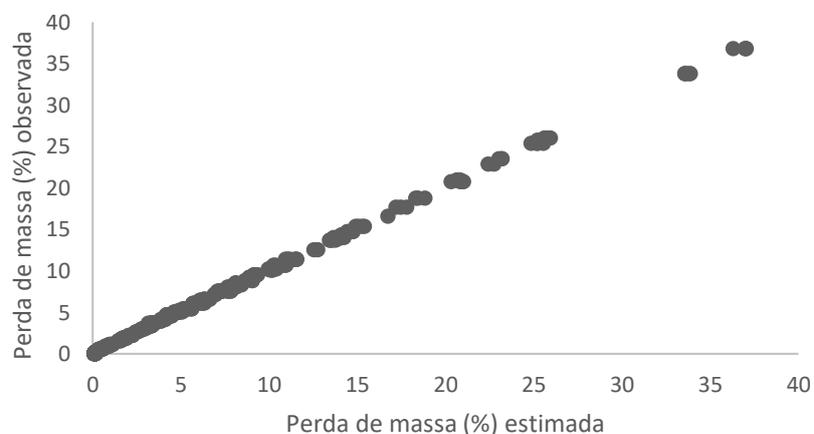


Figura 56. Relação entre a perda de massa observada e estimada no treinamento da RNA5 em função dos espectros de infravermelho próximo.

A Tabela 13 apresenta um resumo da predição de perda de massa para o último período de avaliação, utilizando os dados de generalização. Em campo de apodrecimento, foi possível determinar a vida útil da madeira de marupá sem tratamento, pela metodologia tradicional e com dados de todas as amostras, em torno de 40 meses após perder 26,61% de sua massa. Logo, a troca da peça deveria ocorrer entre 3 e 4 anos, antes da sua quebra. As estimativas de perda de massa realizadas pelas redes treinadas tanto com dados de ultrassom quanto de NIR foram bastante satisfatórias, com valores muito

próximos ao valor real observado em campo, implicando confiabilidade para aplicação em madeiras em serviço, de modo que a troca da peça seja efetuada antes de sua quebra, evitando, assim, prejuízos econômicos e estruturais.

Tabela 13. Resumo das estimativas de perda de massa realizadas após a generalização.

Espécie	Tratamento químico	Período avaliação	PM% observada	PM% estimada	
				RNA 2 (US)	RNA 5 (NIR)
Marupá	Sem tratamento	3	25,74	25,05	25,24
	CCA-C	3	5,96	5,95	5,87
Curupixá	Sem tratamento	3	24,25	24,40	24,24
	CCA-C	3	9,73	9,81	9,58

Em que: CCA-C = Arseniato de cobre cromatado tipo C; PM% = Perda de massa em porcentagem; RNA = redes neurais artificiais; US = ultrassom; e NIR = *Near-infrared spectroscopy* (espectroscopia no infravermelho próximo).

As redes neurais artificiais têm sido uma ferramenta eficiente na predição de propriedades da madeira, como módulo de ruptura e de elasticidade, compressão paralela e perpendicular às fibras, dureza janka, cisalhamento, retração tangencial e volumétrica, discriminação de espécies similares, densidade básica, variação dimensional, densidade energética e teor de umidade (TIRYAKI; HAMZAÇEBI, 2014; OLIVEIRA et al., 2015; ZANUNCIO et al., 2016; TIRYAKI et al., 2016; VALE et al., 2017; MIGUEL et al., 2018; SILVA et al., 2018; REIS et al., 2018).

Entretanto, na área de biodeterioração de madeiras esta ferramenta de inteligência artificial ainda não havia sido empregada, o que ressalta a importância do presente trabalho, uma vez que acrescentou a viabilidade de sua utilização como opção de teste não destrutivo para determinação da vida útil da madeira, além da praticidade e da possibilidade de detecção prévia de problemas estruturais em madeiras em serviço.

Por fim, recomenda-se avaliação das estacas em campo de apodrecimento por um maior período de tempo, principalmente as tratadas com CCA-C, a fim de realimentar a rede, fornecendo mais dados para o treinamento e tornando-a mais robusta, para aumentar sua precisão na predição da vida útil da madeira em um menor tempo.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O tratamento com o preservante químico hidrossolúvel arseniato de cobre cromatado tipo C (CCA-C) foi eficiente para proteção das estacas de sumaúma, marupá, curupixá e cerejeira contra o ataque de fungos xilófagos e térmitas e da ação do intemperismo, uma vez que todas as estacas continuaram em bom estado de sanidade no campo de apodrecimento.

Pelo método tradicional, foi possível determinar a vida útil de sumaúma e marupá não tratadas quimicamente em aproximadamente 26 e 40 meses, respectivamente. Para curupixá e cerejeira, não houve tempo suficiente para determinação de sua vida útil.

A porção soterrada das estacas apresentou maior deterioração ao longo do período de exposição em campo de apodrecimento, em virtude da presença de fungos xilófagos e térmitas, além da umidade do solo.

As avaliações não destrutivas por meio de ultrassom e espectroscopia no infravermelho próximo mostraram-se eficazes para o monitoramento do estado de sanidade de amostras de madeira expostas a agentes biodeterioradores em campo de apodrecimento.

As redes neurais perceptron de múltiplas camadas (MLP) utilizando como variáveis preditoras o tratamento químico, o período de avaliação em campo, a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas e os espectros de infravermelho próximo foram precisas na estimativa de perda de massa decorrente de biodeterioração e, conseqüentemente, da vida útil da madeira.

Os resultados indicaram que essa ferramenta de inteligência artificial pode ser usada de maneira prática e eficiente para detecção prévia de biodeterioração e de problemas estruturais em madeiras em serviço, podendo auxiliar na previsão de custos relacionados à substituição de peças.

Recomenda-se que sejam realizadas avaliações por períodos de tempo mais longos, utilizando dados provenientes de outras técnicas não destrutivas, com outras espécies de madeiras, inclusive tratadas quimicamente, para ratificar a eficiência da técnica na predição da vida útil da madeira e em um menor tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. M. C.; OLIVEIRA, E.; CALEGARI, L.; NETO, P. N. M.; S, P. A. Avaliação físico-química e energética da madeira das espécies *Piptadeni stipulacea* (Benth.) Ducke e *Amburana cearensis* (Allemão) A. C. Smith de ocorrência no semiárido nordestino brasileiro. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 1, p. 165–173, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – ASTM. **ASTM D1758-06**: Standard test method of evaluating wood preservatives by field tests with stake. West Conshohocken, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – ASTM. **ASTM D2395**: Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of wood and wood-based materials. West Conshohocken, 2014.

AMORIN, M. R. S. **Agrupamento de espécies madeireiras amazônicas para a produção de painéis de lâminas paralelas (LVL)**. 2013. 103f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

ANDRADE, C. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; QUINHONES, R.; LIMA, J. T. Calibrações por meio da técnica da espectroscopia no infravermelho próximo para teor de extrativos totais, de lignina total e holocelulose usando espectros obtidos na madeira sólida. **Ambiência Guarapuava**, v.7, n.1, p. 39-49, jan./abr., 2011.

ARANTES, V.; MILAGRES, A.M.F. Relevância de compostos de baixa massa molar produzidos por fungos e envolvidos na biodegradação da madeira. **Química Nova**, v.32, n.6, p.1586-1595, 2009.

ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; SOUZA, P. D.; ASSIS, A. L.; CABACINHA, C. D.; LEITE, H. G.; SOARES, C. P. B.; SILVA, A. A. L.; CASTRO, R. V. O. Artificial neural networks, quantile regression and linear regression for site index prediction in the presence of outliers. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6232** - Penetração e retenção de preservativo em postes de madeira. Rio de Janeiro, 1973. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9480** - Peças roliças preservadas de eucalipto para construções rurais – Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.12 p.

- BARBOSA, L. C. A. **Espectroscopia no infravermelho na caracterização de compostos orgânicos**. Viçosa: Ed. UFV, 2013.
- BASTOS, L. F.; ALESSIO, K. O.; MENEZES, C. M.; COSTA, A. B.; MARDER, L. Aplicação da espectroscopia no infravermelho próximo e da análise exploratória de dados para identificação de madeiras na indústria de móveis. **Tecno-Lógica**, Santa Cruz do Sul, v. 16, n. 1, p. 25-29, jan./jun., 2012.
- BEALL, F. C. Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. **Wood Science and Technology**, v. 36, n. 3, p. 197–212, 2002.
- BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Configuração de redes neurais artificiais para estimação do volume de árvores. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, Pelotas, v. 5, n. 1, p. 58-67, mai., 2014.
- BINOTI, M. L. M. S. **Redes neurais artificiais para prognose da produção de povoamentos não desbastados de eucalipto**. 2010. 64f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.
- BRAGA, A. P. LUDEMIR, T. B. CARVALHO, A. C. P. F. **Redes neurais artificiais – teoria e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 237p. 2000.
- BRAGA, J. W. B. B.; PASTORE, T. C. M.; CORADIN, V. T. R.; CAMARGOS, J. A. A.; SILVA, A. R. The use of near infrared spectroscopy to identify solid wood specimens of *Swietenia macrophylla*. **IAWA Journal**, Vol. 32, n. 2, p.285–296, 2011.
- BRAZOLIN, S.; LANA, E. L.; MONTEIRO, M. B. B.; LOPEZ, G. A. C.; PLETZ, E. Preservação de madeira: sistema de classes de risco. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, São Carlos, SP, n. 3, art. 5, maio/ago. 2004. 13 p.
- BUCUR, V. **Acoustics of wood**. Germany: Springer-Verlag, 2006. 403 p.
- BULLINARIA, J. A. **Introduction to Neural Computation**. Disponível em: <https://www.cs.bham.ac.uk/~jxb/inc.html>. 2016. Acesso em: 3/2/2020.
- BÜTLER, R.; PATTY, L.; LE BAYON, R. -C.; GUENAT, C.; SCHLAEPFER, R. Log decay of *Picea abies* in the swiss jura mountains of central Europe. **Forest Ecology and Management**, v. 242, p. 791–799, 2007.

CALEGARI, L. **Uso da onda ultra-sônica como meio de controle do processo de secagem da madeira**. Santa Maria: UFSM, 2006. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, 2006.

CALEGARI, L.; STANGERLIN, D. M.; SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A.; CARMO, P. I. O.; SILVA FILHO, L. C. P. Avaliação de alguns fatores influentes na velocidade ultra-sônica na madeira. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 4, p. 607-615, out./dez., 2008.

CANDIAN, M. SALES, A. Aplicação das técnicas não-destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.9, n.4, p. 83-98, 2009.

CARNEIRO, J. S.; EMMERT, L.; STERNADT, G. H.; MENDES, J. C.; ALMEIDA, G. F. Decay susceptibility of Amazon wood species from Brazil against white rot and brown rot decay fungi In: 10th EWLP, Stockholm, Sweden, 2008. **Holzforschung**, v. 63, n. 6, 1 jan. 2009.

CASTRO, R. V. O. **Modelagem do crescimento em nível de árvores individuais utilizando redes neurais e autômatos celulares**. 2011. 90f. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

CASTRO, R. V. O.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, F. B.; LEITE, H. G. Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.48, n.3, p.287-295, mar. 2013.

CHEN, W. C.; TSENG, L.Y.; WU, C. S. A unified evolutionary training scheme for single and ensemble of feedforward neural network. **Neurocomputing**, v. 143(C), p. 347-361, 2014.

CLAUSEN, C. A. Biodeterioration of wood. In: **Wood Handbook – Wood as an engineering material**. 100.ed. Madison: USDA, 2010. p.312-327.

COLODETTE, J. L. **Wood chemistry course**. Viçosa: UFV, 2005. 230 p.

CORADIN, V. T. R.; CAMARGOS, J. A. A.; MARQUES, L. F.; SILVA JR., E. R. **Madeiras similares ao mogno (*Swietenia macrophylla* King): chave ilustrada para identificação anatômica em campo**. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2009.

COSTA, A. F.; VALE, A. T.; GONZALEZ, J. C.; SOUZA, F. D. M. Durabilidade de madeiras tratadas e não tratadas em campo de apodrecimento. **Floresta e Ambiente**. v.12, n.1, p. 7-14, 2005.

COSTA, M. A. **Avaliação de metodologias alternativas para caracterização do ataque de fungos apodrecedores de madeiras**. 2009. 83f. Dissertação de mestrado - Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

EATON, R.A.; HALE, M.D.C. **Wood: decay, pests and protection**. Londres: Chapman e Hall, 1993. 546p.

EGRIOGLU, E.; YOLCU, U.; ALADAG, C. H.; BAS, E. Recurrent multiplicative neuron model artificial neural network for non-linear time series forecasting. **Procedia – Social and Behavioral Sciences**, v. 109, p. 1094-1100, 2014.

ENOKI, A.; ITAKURA, S.; TANAKA, H. The involvement of extracellular substances for reducing molecular oxygen to hydroxyl radical and ferric iron to ferrous iron in wood degradation by wood decay fungi. **Journal of biotechnology**, v. 53, p. 265-272, 1997.

ESTEBAN, L. G.; PALACIOS, P.; CONDE, M.; FERNÁNDEZ, F. G.; GARCÍA-IRUELA, ALBERTO; GONZÁLEZ-ALONSO, M. Application of artificial neural networks as a predictive method to differentiate the wood of *Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* Arn subsp. *Salzmannii* (Dunal) Franco. **Wood Science Technology**, v. 51, n. 5, p. 1249-1258, 2017.

FACKLER, K.; SCHWANNINGERA, M.; GRADINGER, C.; SREBOTNIK, E.; HINTERSTOISSER, B.; MESSNER, K. Fungal decay of spruce and beech wood assessed by near-infrared spectroscopy in combination with uni- and multivariate data analysis. **Holzforschung**, v. 61, p. 680–687, 2007.

FAUSETT, L. **Fundamentals of neural networks: Architecture, algorithms and applications**. 1.ed. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1994. 461p.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions**. Berlin, New York: Ed. Walter de Gruyter, 1989, 613p.

FERNANDES, A.; LOUSADA, J.; MORAIS, J.; XAVIER, J.; PEREIRA, J.; MELO-PINTO, P. Comparison between neural networks and partial least squares for intra-growth ring wood density measurement with hyperspectral imaging. **Computers and electronics in agriculture**, v. 94, p. 71-81, 2013.

FINI, S. H. A.; FARZANEH, M.; ERCHIQUI, F. Study of the elastic behaviour of wood–plastic composites at cold temperatures using artificial neural Networks. **Wood Science and Technology**, v. 49, p. 695-705, 2015.

GALVÃO, A. P. M.; MAGALHÃES, W. L. E.; MATTOS, P. P. **Processos práticos para preservar a madeira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2004. 49p.

GATTO, D. A.; GONÇALVES, M. R.; MATTOS, B. D.; CALEGARI, L.; STANGERLIN, D. M. Estimativa da deterioração da madeira de assoalho de prédio histórico por meio de ondas ultrassônicas. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 4, p. 651-656, out./dez. 2012.

GE, L.; CHEN, G-S. Control modeling of ash wood drying using process neural networks. **Optik**, v. 125, p. 6770–6774, 2014.

GOMES, J. I.; FERREIRA, G. C. **Durabilidade natural de quatro madeiras amazônicas em contato com o solo**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2002. 3p. (Embrapa Amazônia Oriental. Comunicado Técnico, 66).

GORING, D. A. I.; TIMELL, T. E. (1962). Molecular weight of native celluloses. **Tappi**, v. 45, n. 6, p. 454–460, 1962.

GORNIK, E.; MATOS, J. L. M. **Métodos Não Destrutivos para Determinação e Avaliação de Propriedades da Madeira**. ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA EM ESTRUTURA DE MADEIRA, 7., 2000, São Carlos. Anais... São Carlos, 2000.

GUERROUT, E. H.; AIT-AOUDIA, S.; MICHELUCCI, D.; MAHIOU, R. Hidden Markov random field model and Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno algorithm for brain image segmentation., **Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence** v. 30, n. 3, p. 415–427, 2018.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900p.

HEATON, J. **Programming Neural Networks with Encog3 in Java**. 2ed. St. Louis: Heaton Research Incorporated, 240p, 2011.

HEIDARI, E.; SOBATI, M. A.; MOVAHEDIRAD, S. Accurate prediction of nanofluid viscosity using a multilayer perceptron artificial neural network (MLP-ANN). **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 155, p. 73-85, 2016.

HEIN, P. R. G.; LIMA, J. T.; CHAIX, G. Otimização de calibrações baseadas em espectroscopia no infravermelho próximo para estimativa de propriedades da madeira de *Eucalyptus*. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 3, p. 615-624, jul./set. 2010.

HIGHLEY, T. L. Cellulolytic activity of brown-rot and white-rot fungi on solid media, **Holzforschung**, v. 42, p. 211-216, 1988.

HOLLER, F. J.; SKOOG, D. A.; CROUCH, S. R. **Princípios de Análise Instrumental**. 6ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2009.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. Disponível em: http://www.ibama.gov.br/phocadownload/qualidadeambiental/preservativos_de_madeira/2019/02-01-2019-ibama-tanalith-60-CCA-C.pdf. Acessado em: 15/10/2019.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. Disponível em: http://www.ibama.gov.br/phocadownload/qualidadeambiental/preservativos_de_madeira/2019/2019-07-16-ibama-Jimo-TBF-Concentrado.pdf. Acessado em: 15/10/2019.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. Disponível em: http://www.ibama.gov.br/phocadownload/qualidadeambiental/preservativos_de_madeira/2017-registrados/jimo-ecomofa.pdf. Acessado em: 15/10/2019.

Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais - IPEF. Disponível em: <https://www.ipef.br/identificacao/amburana.cearensis.asp>. Acessado em: 11/10/2019.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/74-ceiba.htm. Acessado em: 11/10/2019.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/43-simaroubaceae.htm. Acessado em: 11/10/2019.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/58-amburana.htm. Acessado em: 11/10/2019.

JANKOWSKY, I. P.; BARILLARI, C. T.; FREITAS, V. P. A preservação de madeiras no Brasil. **Revista da Madeira**, n.67, 2002.

- JOHNSTONE, D.; MOORE, G.; TAUSZ, M.; NICOLAS, M. The measurement of wood decay in landscape trees. **Arboriculture & Urban Forestry**, v. 36, n. 3, p. 121-127, 2010.
- KLOCK, U.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**. 4ª edição. Curitiba, 2013. 85p.
- KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**. 3ª edição. Curitiba: FUPEF, 2005. 86p.
- LAZZAROTTO, M.; NETIPANYJ, R. R.; MAGALHÃES, W. L. E.; AGUIAR, A. V. Espectroscopia no infravermelho próximo para estimativa da densidade básica de madeiras de *Pinus*. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 7, n. 3, p. 119-126, 2016.
- LEBOW, S. T. Wood preservation. In: **Wood handbook – Wood as an engineering material**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 2010. 508 p.
- LEPAGE, E. S. Preservativos e sistemas preservativos. In: **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT, 1986. v.1, p.279-342.
- LEPAGE, E. S.; GERALDO, F. C.; ZANOTTO, P. A.; MILANO, S. Métodos de tratamento. In: **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT, 1986. v.2, p.343-419.
- LIMA, D. U. **Interação molecular entre celulose e hemiceluloses e suas implicações biológicas e tecnológicas**. 2002. 110f. Tese de doutorado – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.
- LOPEZ, G. A. C.; MILANO, S. Avaliação da durabilidade natural da madeira de produtos usados na sua proteção. In: LEPAGE, E. S. (Coord.). **Manual de preservação de madeiras**. Vol II. São Paulo: IPT, 1986.
- LOUREIRO, A. A.; SILVA, M. F.; ALENCAR, J. C. **Essências madeireiras da Amazônia**. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, INPA, Vol. 2, 1979.
- MAGALHÃES, W. L. E.; PEREIRA, J. C. D.; MUÑIZ, G. I. B.; KLOCK, U.; SILVA, J. R. M. Determinação de propriedades químicas e anatômicas de madeira com o uso da reflexão difusa de infravermelho próximo. **Bol. Pesq. Fl., Colombo**, n. 50, p. 25-36, jan./jun., 2005.

- MANTOVANI, G. Z. **Estruturas de madeira: uso do ultrassom na localização de defeitos**. Florianópolis: UFSC, 2014. 136f. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.
- MARTINS, E. R.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G.; BINOTI, D. H. B.; DUTRA, G. C. Configuração de redes neurais artificiais para estimação do afilamento do fuste de árvores de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 11, n. 1, p. 33-38, 2016.
- MATLAB R2018a. The MathWorks, 2018.
- MATOSKI, S. L. S.; ROCHA, M. P. da. Influência do fotoperíodo no ataque de *Dinoderus minutus* Fabricius (Coleoptera: Bostrichidae) em lâminas torneadas de espécies tropicais. **Floresta**, v. 36, n. 3, p. 385–396, 2006.
- MATTOS, B. D.; CADEMARTORI, P. H. G.; LOURENÇON, T. V.; GATTO, D. A.; MAGALHÃES, W. L. E. Biodeterioration of wood from two fast-growing eucalyptus exposed to field test. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 93, p.210-215, 2014.
- MEDEIROS, F. C. M.; GOUVEIA, F. N.; BIZZO, H. R.; VIEIRA, R. F.; DEL MENEZZI, C. H. S. Fungicidal activity of essential oils from Brazilian Cerrado species against wood decay fungi. **International Biodeterioration & Biodegradation**. v.114, p. 87-93, 2016.
- MENDES, A. S.; ALVES, M. V. S. **A degradação da madeira e sua preservação**. Brasília, IBDF/DPq-LPF, 1988.
- MIGUEL, E. P.; MELO, R. R.; SERENINI JUNIOR, L.; DEL MENEZZI, C. H. S. Using artificial neural networks in estimating wood resistance. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 20, n. 4, p. 531-542, 2018.
- MIGUEL, E. P.; MOTA, F. C. M.; TÊO, S. J; NASCIMENTO, R. G. M.; LEAL, F. A.; PEREIRA, R. S.; REZENDE, A. V. Artificial intelligence tools in predicting the volume of trees within a forest stand. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 21, p. 1914-1923, 2016.
- MIGUEL, E. P.; REZENDE, A. V.; LEAL, F. A.; MATRICARDI, E. A. T.; VALE, A. T.; PEREIRA, R. S.; Redes neurais artificiais para a modelagem do volume de madeira e biomassa do cerradão com dados de satélite. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 9, p. 829-839, 2015.

- MILAGRES, F. R.; GOMIDE, J. L.; MAGATON, A.; FANTUZZI NETO, H. Influência da idade na geração de modelos de espectroscopia NIR, para predição de propriedades da madeira de *Eucalyptus* spp. **Revista Árvore**, Viçosa, v.37, n.6, p.1165-1173, 2013.
- MIRANDA, F. A.; FREITAS, S. R. C.; FAGGION, P. L. Integração e interpolação de dados de anomalias ar livre utilizando-se a técnica de RNA e krigagem. **Bol. Ciênc. Geod.**, Curitiba, v. 15, n. 3, p.428-443, 2009.
- MORESCHI, J. C. **Biodegradação e preservação da madeira: Biodegradação da madeira**. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, v. 1, n.4, 2013.
- MUÑIZ, G. I. B.; MAGALHÃES, W. L. E.; CARNEIRO, M. E.; VIANA, L. C. Fundamentos e estado da arte da espectroscopia no infravermelho próximo no setor de base florestal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 865-875, out/dez., 2012.
- NASCIMENTO, C. C.; BRASIL, M. M.; NASCIMENTO, C. S.; BARROS, S. V. S. Estimativa da densidade básica da madeira de *Eschweilera odora* (Poepp.) Miers por espectroscopia no infravermelho próximo. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 8(1), p. 42-53, 2017.
- NESVIJISKI, E. G. On design of ultrasonic transducers and accuracy of velocity measurements. **NDT.net**, v. 5, n. 2, 2000.
- OLIVEIRA, A. A.; SIQUEIRA, P. H.; NISGOSKI, S.; MUNIZ, G. I. B.; FERREIRA, J. H. Identificação de madeiras utilizando a espectrometria no infravermelho próximo e redes neurais artificiais. **Tendências em Matemática Aplicada e Computacional**, v.16, n. 2, p. 81-95, 2015.
- OLIVEIRA, E. M.; BRAGA, J. W. B. B.; COSTA, A. F. Discriminação de madeiras similares por fluorescência molecular e mínimos quadrados parciais. **Química Nova**, v. 38, n. 9, p. 1176-1180, 2015.
- OLIVEIRA, F. G. R. **Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para ensaios não-destrutivos em madeira serrada por meio de ondas de ultra-som**. 2005. 105f. Tese de doutorado – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- OLIVEIRA, F. G. R.; MILLER, K. P.; CANDIAN, M.; SALES, A. Efeito do comprimento do corpo-de-prova na velocidade ultra-sônica em madeiras. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.30, n.1, p.141-145, 2006.

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A. Efeito da densidade e do teor de umidade na velocidade ultra-sônica da madeira. **Minerva**, v.2, n.1, p.25-31, 2005.

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A. Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. **Bioresource Technology**, v. 97, n.18, p. 2443–2446, 2006.

OLIVEIRA, J. T.; TOMASELLO, M.; SILVA, J. C. Resistência natural da madeira de sete espécies de eucalipto ao apodrecimento. **Revista Árvore**, v.29, n.6, p. 993-998, 2005.

PAES, J. B.; MORAIS, V. M.; LIMA, C. R. Resistência natural de nove espécies de madeiras do semi-árido brasileiro a fungos xilófagos em condições de laboratório. **Revista Árvore**, v.28, n.2, p.275-282, 2004.

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 198-219, mar./abr. 2003.

PASTORE, T. C. M.; BRAGA, J. W. B. B.; CORADIN, V. T. R.; MAGALHÃES, W. L. E.; OKINO, E. Y. A.; CAMARGOS, J. A. A.; MUÑIZ, G. I. B.; BRESSAN, O. A.; DAVRIEUX, F. Near infrared spectroscopy (NIRS) as a potential tool for monitoring trade of similar woods: Discrimination of true mahogany, cedar, andiroba, and curupixá. **Holzforschung**, v. 65, p. 73-80, 2011.

PAVIA, D. L.; LAMPMAN, G. M.; KRIZ, G. S.; VYVYAN, J. R. **Introdução à espectroscopia**. 2ª edição. São Paulo: Cengage Learning, 2015. 733p.

PECORARO, E.; PIZZO, B.; ALVES, A.; MACCHIONI, N.; RODRIGUES, J. C. Measuring the chemical composition of waterlogged decayed wood by near infrared spectroscopy. **Microchemical journal**, v. 122, 2015.

PETTERSON, R.C., 1984. The chemical composition of wood. In: Rowell, R. (Ed.), **Chemistry of Solid Wood**, Advances in Chemistry Series, vol. 207. American Chemical Society, Washington, DC, p. 57–126., 1984.

POPE, J. M. Near-infrared spectroscopy of wood products. In: CONNERS, T. E.; BANERJEE, S. (Ed.). **Surface analysis of paper**. Boca Raton: CRC Press, 1995. p. 142-151.

- PUCCINI, C.T. **Avaliação de aspectos de qualidade da madeira utilizando o ultrassom**. 72p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola – Construções Rurais e Ambientação). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas, Campinas. 2002.
- PUEHRINGER, C. A. **Uso de emissão de ondas de tensão para avaliação não destrutiva de árvores e da madeira de *Pinus taeda* L.** 104 f. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- REIS, P. C. M.; SOUZA, A. L.; REIS, L. P.; CARVALHO, A. M. M. L.; MAZZEI, L.; RÊGO, L. J. S.; LEITE, H. G. Artificial neural networks to estimate the physical-mechanical properties of Amazon second cutting cycle wood. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 20, n. 3, p. 343-352, 2018.
- RIBEIRO, M. A.; STANGERLIN, D. M.; SOUZA, A. P.; CARDOSO, G. V.; CALEGARI, L.; GATTO, D. A. Durabilidade natural da madeira de jequitibá em ensaios de deterioração em campo aberto e floresta durante as estações de seca e chuva. **Comunicata Scientiae**, v.5, n.4, 402-411, 2014.
- RICHARDSON, B. A. **Wood preservation**. London: Construction Press, 1978. 238 p.
- ROSS, R. J. **Nondestructive evaluation of wood**: second edition. General Technical Report FPL-GTR-238. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2015. 169 p.
- ROWELL, R. M.; PETERSEN, R.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S.; TSHABALALA, M. A. Cell Wall Chemistry. In: **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. Editado por Roger M. Rowell. New York: Editora Taylor & Francis Group, 2005.
- ROWELL, R.M. **Wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC Press, 2005. 473p.
- SANDAK, A.; FERRARI, S.; SANDAK, J.; ALLEGRETTI, O.; TERZIEV, N.; RIGGIO, M.; Monitoring of wood decay by near infrared spectroscopy. **Advanced Materials Research**, v. 778, p. 802-809, 2013.
- SANTINI, E. J. **Biodeterioração e preservação da madeira**. Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 1988.
- SANTOS, R. B.; GOMIDE, J. L.; SOUZA, L. C. Predição de qualidade da madeira e da polpa celulósica por técnica de espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 4, p.759-767, 2009.

SANTOS, R. B.; GOMIDE, J. L.; SOUZA, L. C. Predição de qualidade da madeira e da polpa celulósica por técnica de espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 4, p.759-767, 2009.

SANTOS, S. H. M.; Sumaúma: *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. **Recomendações técnicas**. Embrapa Amazônia Oriental, 2002.

SANTPANDEY, D. K.; PANDEY, S. Ultrasonics: A technique of material characterization. **Acoustic Waves**, Book edited by: Don W. Dissanayake, 2010.

SCHAD, K. C.; SCHMOLDT, D. L.; ROSS, R. J. **Nondestructive methods for detecting defects in softwood logs**. US Forest Laboratory. Research Paper FPL n. 546, Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1996.

SCHEFFER, T. C. Microbiological degradation and the causal organisms. In: **Wood deterioration and its prevention by preservative treatments**. Syracuse, Syracuse University Press, v. 1, 1973.

SCHWANNINGER, M.; RODRIGUES, J. C.; FACKLER, K. A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components. **Near Infrared Spectroscopy**, v. 19, p. 287–308, 2011.

SHEBANI, A. N.; VAN REENEN, A. J.; MEINCKEN, M. The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species. **Thermochimica Acta**, v. 471 p. 43–50, 2008.

SHIMOYAMA, V.R. de S. **Estimativas de propriedades da madeira de Pinus taeda através do método não-destrutivo emissão de ondas de tensão, visando à geração de produtos de alto valor agregado**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. 151p.

SILVA, D. C. **Determinação da origem de madeira (*Swietenia macrophylla*) proveniente de cinco países da América Latina e discriminação entre as essas espécies de mogno *S. macrophylla* e *S. humilis* usando equipamentos NIRS portáteis e análise multivariada**. 2018. 67f. Dissertação de mestrado - Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas**. São Paulo: Artiber, 2010.

SILVA, J. C. Madeira preservada e seus conceitos. **Revista da madeira**, n.103, 2007.

SILVA, J. P. M.; CABACINHA, C. D.; ASSIS, A. L.; MONTEIRO, T. C.; ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; MAIA, R. D. Redes neurais artificiais para estimar a densidade básica de madeiras do cerrado. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, n. e201701656, p. 1–10, 2018.

SILVA, S. S. **Contribuição ao estudo morfo-anatômico de espécies de *Micropholis* (Griseb.) Pierre (Sapotaceae. Juss.) no Estado do Pará**. 2004. Dissertação de mestrado – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2004.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Fundamentos de química analítica**. 9ª edição. São Paulo: Cengage Learning, 2018. 950p.

SOARES, L. F.; SILVA, D. C.; BERGO, M. C. J.; CORADIN, V. T. R.; BRAGA, J. W. B.; PASTORE, T. C. M. Avaliação de espectrômetro NIR portátil e PLS-DA para a discriminação de seis espécies similares de madeiras amazônicas. **Química Nova**, v. 40, n. 4, p. 418-426, 2017.

SOUZA, A.; GAYLARDE, C. C. Biodeterioration of varnished wood with and without biocide: implications for standard test methods. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 49, p. 21-25, 2002.

SOUZA, L. C.; GOMIDE, J. L.; MILAGRES, F. R.; ALMEIDA, D. P. Desenvolvimento de modelos de calibração NIRS para minimização das análises de madeiras de *Eucalyptus* spp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 591-599, jul./set., 2011.

STANGERLIN, D. M.; COSTA, A. F.; GONÇALEZ, J. C.; PASTORE, T. C. M.; GARLET, A. Monitoramento da biodeterioração da madeira de três espécies amazônicas pela técnica da colorimetria. **Acta Amazônica**, v. 43, n. 4, p. 429-438, 2013.

STANGERLIN, D. M.; GATTO, D. A.; MELO, R. R.; CALEGARI, L.; VIVIAN, M. A.; CASTELO, P. A. R.; BELTRAME, R. Uso do ultrassom para estimativas das propriedades mecânicas da madeira de *Peltophorum dubium*. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 01, n. 02, p. 44-53, nov., 2010.

STATSOFT, INC. Statistica: Data analysis software system, 2011.

STEVANOVIC, T. Chemical composition and properties of wood. **Lignocellulosic fibers and wood handbook**, Wiley-Blackwell, p. 49-106, 2016.

SYOFUNA, A.; BANANA, A. Y.; NAKABONGE, G. Efficiency of natural wood extractives as wood preservatives against termite attack. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 14, n. 2, p. 155-163, 2012.

TAFNER, M. A.; XEREZ, M.; RODRIGUES FILHO, I. W. **Redes neurais artificiais – Introdução aos princípios de neurocomputação**. Blumenau: Eko e Furb, 1996. 199p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4ª edição. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819p.

TAPPI. **T 204 om-88**: Solvent extractives of wood and pulp. Atlanta, GA: Technical Association of the Pulp and Paper Industry - TAPPI. [s.d.]

TAPPI. **T 211 om-93**: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C. Atlanta, GA: Technical Association of the Pulp and Paper Industry - TAPPI. [s.d.]

TELES, C. D. M. **Estruturas de madeira: proposta de metodologia de inspeção e correlação da velocidade ultra-sônica com o dano por cupins**. 2002. 132 f. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

TELES, R. F. **Ensaio não destrutivo para avaliar o desempenho de madeiras amazônicas tratadas quimicamente**. 2014. 209f. Tese de doutorado - Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

TELES, R. F.; COSTA, A. F.; SOUZA, M. R. Cor e rugosidade de superfícies de madeiras tropicais. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 1, p. 100-108, 2016.

TEMPLETON, D.; EHRMAN, T. **LAP – 003**: Determination of acid-insoluble lignin in biomass. National Renewable Energy Laboratory – NREL, 1995.

TEMPLETON, D.; EHRMAN, T. **LAP – 004**: Determination of acid-soluble lignin in biomass. National Renewable Energy Laboratory – NREL, 1996.

TIMELL, T. E. Recent progress in the chemistry and topochemistry of compression wood. **Wood Science and Technology**, v.16, p. 83–122, 1982.

TIRYAKI, S.; BARDAK, S.; AYDIN, A.; NEMLI, G. Analysis of volumetric swelling and shrinkage of heat treated woods: experimental and artificial neural network modeling approach. **Maderas: Ciencia y tecnología**, v. 18, n. 3, p. 477-492, 2016.

TIRYAKI, S.; HAMZAÇEBI, C. Predicting modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) of heat treated woods by artificial neural networks. **Measurement**, v.49, p. 266-274, 2014.

TREVIZOR, T. T. **Anatomia comparada do lenho de 64 espécies arbóreas de ocorrência natural na floresta tropical Amazônica no Estado do Pará**. 2011. Dissertação de mestrado – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2011.

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, 1996.

TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.; SILVA, J. R. M.; LIMA, J. T. **Influência da idade nas características físicas, químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis***. In: Proceedings of the 4th IUFRO Conference on Silviculture and Improvement of *Eucalyptus*, 1997, Salvador, p. 269-275.

VALE, A. T. DO; MIGUEL, E. P.; MOREIRA, A. C. DE O.; LIMA, C. M.; ORELLANA, B. B. M. A.; FORTES, M. M.; MACHADO, M. P. O.; GONÇALEZ, J. C.; MARTINS, I. S. Artificial neural networks in predicting energy density of *Bambusa vulgaris* in Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 10, p. 856–862, 2017.

VALLE, M. L. A.; SILVA, J. C.; DELLA LUCIA, R. M.; EVANGELISTA, W. V. Retenção e penetração de CCA em madeira de primeira e segunda rotação de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 2, p. 481-490, 2013.

VÁSQUEZ, M.; RECABARREN, A. **Preservación de la madera**. Documento técnico, n.2, 2005.

VICENTE, H.; ROSEIRO, J. C.; ARTEIRO, J. M.; NEVES, J.; CALDEIRA, T. Prediction of bioactive compound activity against wood contaminant fungi using artificial neural networks. **Canadian Journal of Forest Research**. v. 43, p. 985-992, 2013.

VIDAL, J. M.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; JANKOWSKY, I. P. Preservação de madeiras no Brasil: Histórico, cenário atual e tendências. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 257-271, jan.-mar., 2015.

VIEIRA, L. F. S. **Influência da composição química de quatro espécies amazônicas na resistência natural ao ataque de fungos apodrecedores**. 2019. 86f. Dissertação de mestrado – Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

WINANDY, J. E.; ROWELL, R. M. The chemistry of wood strength. **The chemistry of solid wood**. CRC Press, p. 211-255, 1984.

ZABEL, R. A., MORRELL, J. J. **Wood Microbiology: Decay and its preservation**. San Diego: Academic Press, 1992.

ZANETTI, S. S.; CECÍLIO, R. A.; SILVA, V. H.; ALVES, E. G. General calibration of TDR to assess the moisture of tropical soils using artificial neural networks. **Journal of Hidrology**, v. 530, p. 657-666, 2015.

ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; SILVA, L. F. DA; CARNEIRO, A. DE C. O.; COLODETTE, J. L.; ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; SILVA, L. F. DA; CARNEIRO, A. DE C. O.; COLODETTE, J. L. Artificial neural networks as a new tool for assessing and monitoring wood moisture content. **Revista Árvore**, v. 40, n. 3, p. 543–549, 2016.

ZOMBORI, B. "In situ" Nondestructive Testing of Built in Wooden Members. **NDT.net**, v. 6, n. 3, 2001.

APÊNDICE

Tabela 1. Análise descritiva da massa de sumaúma sem tratamento e tratada com CCA em campo de apodrecimento.

Tratamento	Avaliação	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)	Mínimo	Máximo
Sem tratamento	1	372.87	72.62	19.48	201.98	425.45
	2	326.90	71.85	21.98	182.29	408.07
	3	279.86	52.35	18.71	156.44	325.85
	4	-	-	-	-	-
CCA	1	244.98	46.04	18.79	214.83	391.26
	2	264.01	43.88	16.62	223.72	396.05
	3	224.98	52.74	23.44	188.33	394.79
	4	204.61	51.01	24.93	173.19	371.13

Tabela 2. Análise descritiva da massa de marupá sem tratamento e tratada com CCA em campo de apodrecimento.

Tratamento	Avaliação	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)	Mínimo	Máximo
Sem tratamento	1	307.86	23.16	7.52	264.94	341.65
	2	297.40	20.87	7.02	262.83	321.03
	3	272.42	22.46	8.25	219.53	306.78
	4	225.91	31.11	13.77	175.51	253.41
CCA	1	344.49	19.39	5.63	296.92	361.59
	2	339.96	19.68	5.79	297.69	363.64
	3	338.80	17.56	5.18	295.19	359.18
	4	325.30	17.47	5.37	281.64	345.88

Tabela 3. Análise descritiva da massa de curupixá sem tratamento e tratada com CCA em campo de apodrecimento.

Tratamento	Avaliação	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)	Mínimo	Máximo
Sem tratamento	1	476.36	16.63	3.49	449.89	501.57
	2	473.15	21.73	4.59	434.41	508.95
	3	429.21	33.49	7.80	366.24	488.14
	4	365.72	34.92	9.55	301.87	413.10
CCA	1	522.97	13.85	2.65	495.17	541.22
	2	502.90	10.59	2.11	488.44	524.19
	3	499.88	13.09	2.62	481.76	525.14
	4	474.64	10.91	2.30	458.35	493.53

Tabela 4. Análise descritiva da massa de cerejeira sem tratamento e tratada com CCA em campo de apodrecimento.

Tratamento	Avaliação	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)	Mínimo	Máximo
Sem tratamento	1	486.00	23.60	4.86	440.55	513.28
	2	501.59	21.93	4.37	461.40	527.68
	3	493.42	22.37	4.53	457.28	523.92
	4	459.02	21.86	4.76	427.94	489.87
CCA	1	443.43	7.13	1.61	435.29	455.52
	2	466.72	7.66	1.64	453.66	476.09
	3	464.04	7.10	1.53	454.31	477.01
	4	433.20	6.96	1.61	421.58	443.64

Tabela 5. Teste de Friedman para massa de sumaúma em relação ao tratamento químico.

Informação	Valor
Friedman qui-quadrado	3
Graus de Liberdade	1
P-valor	0.08326

Tabela 6. Teste de Friedman para massa de marupá em relação ao tratamento químico.

Informação	Valor
Friedman qui-quadrado	4
Graus de Liberdade	1
P-valor	0.04550

Tabela 7. Teste de Friedman para massa de curupixá em relação ao tratamento químico.

Informação	Valor
Friedman qui-quadrado	4
Graus de Liberdade	1
P-valor	0.04550

Tabela 8. Teste de Friedman para massa de cerejeira em relação ao tratamento químico.

Informação	Valor
Friedman qui-quadrado	4
Graus de Liberdade	1
P-valor	0.04550

Tabela 9. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para massa de sumaúma sem tratamento (1) e tratadas com CCA (2).

Tratamentos Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
1 - 2	3	3.39	0.08326452
Tabela dos Agrupamentos			
Tratamento	Soma (Rank)	Grupos	
1	6	a	
2	3	a	

Tabela 10. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para massa de marupá sem tratamento (1) e tratadas com CCA (2).

Tratamentos Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
1 - 2	4	3.92	0.04550
Tabela dos Agrupamentos			
Tratamento	Soma (Rank)	Grupos	
2	8	a	
1	4	b	

Tabela 11. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para massa de curupixá sem tratamento (1) e tratadas com CCA (2).

Tratamentos Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
1 - 2	4	3.92	0.04550
Tabela dos Agrupamentos			
Tratamento	Soma (Rank)	Grupos	
2	8	a	
1	4	b	

Tabela 12. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para massa de cerejeira sem tratamento (1) e tratadas com CCA (2).

Tratamentos Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
1 - 2	4	3.92	0.04550
Tabela dos Agrupamentos			
Tratamento	Soma (Rank)	Grupos	
1	8	a	
2	4	b	

Tabela 13. Teste de Friedman para massa de sumaúma sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.

Tratamento	Informação	Valor
Sem tratamento	Friedman qui-quadrado	20.4615
	Graus de Liberdade	2
	P-valor	3.6044E-05
CCA	Friedman qui-quadrado	37.8923
	Graus de Liberdade	3
	P-valor	2.97882E-08

Tabela 14. Teste de Friedman para massa de marupá sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.

Tratamento	Informação	Valor
Sem tratamento	Friedman qui-quadrado	20.4615
	Graus de Liberdade	2
	P-valor	3.6044E-05
CCA	Friedman qui-quadrado	37.8923
	Graus de Liberdade	3
	P-valor	2.97882E-08

Tabela 15. Teste de Friedman para massa de curupixá sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.

Tratamento	Informação	Valor
Sem tratamento	Friedman qui-quadrado	20.4615
	Graus de Liberdade	2
	P-valor	3.6044E-05
CCA	Friedman qui-quadrado	37.8923
	Graus de Liberdade	3
	P-valor	2.97882E-08

Tabela 16. Teste de Friedman para massa de cerejeira sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.

Tratamento	Informação	Valor
Sem tratamento	Friedman qui-quadrado	20.4615
	Graus de Liberdade	2
	P-valor	3.6044E-05
CCA	Friedman qui-quadrado	37.8923
	Graus de Liberdade	3
	P-valor	2.97882E-08

Tabela 17. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para massa de sumaúma sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.

	Avaliações Comparadas	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
Sem tratamento	1 - 2	13	12.21	0.01079
	1 - 3	23	12.21	6.4623E-06
	2 - 3	10	12.21	0.04986
Tabela dos Agrupamentos				
	Avaliação	Soma (Rank)	Grupos	
	1	38	a	
	2	25	b	
	3	15	b	
	Avaliações Comparadas	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
CCA	1 - 2	14	17.37	0.03344
	1 - 3	11	17.37	0.09472
	1 - 4	25	17.37	0.00015
	2 - 3	25	17.37	0.00015
	2 - 4	39	17.37	3.132E-09
	3 - 4	14	17.37	0.03344
Tabela dos Agrupamentos				
	Avaliação	Soma (Rank)	Grupos	
	2	52	a	
	1	38	a	
	3	27	ab	
	4	13	b	

Tabela 18. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para massa de marupá sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.

	Avaliações Comparadas	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
Sem tratamento	1 - 2	13	17.37	0.04829
	1 - 3	27	17.37	4.1031E-05
	1 - 4	38	17.37	7.8051E-09
	2 - 3	14	17.37	0.03344
	2 - 4	25	17.37	0.00015
	3 - 4	11	17.37	0.09472
	Tabela dos Agrupamentos			
	Avaliação	Soma (Rank)	Grupos	
	1	52	a	
	2	39	a	
	3	25	ab	
	4	14	bc	
	Avaliações Comparadas	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
CCA	1 - 2	2	17.37	0.76126
	1 - 3	12	17.37	0.06831
	1 - 4	28	17.37	2.1045E-05
	2 - 3	14	17.37	0.03344
	2 - 4	30	17.37	5.1809E-06
	3 - 4	16	17.37	0.01507
	Tabela dos Agrupamentos			
	Avaliação	Soma (Rank)	Grupos	
	2	44	a	
	1	42	a	
	3	30	a	
	4	14	ab	

Tabela 19. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para massa de curupixá sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.

	Avaliações Comparadas	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
Sem tratamento	1 - 2	1	17.37	0.87926
	1 - 3	20	17.37	0.00238
	1 - 4	33	17.37	5.3571E-07
	2 - 3	19	17.37	0.00390
	2 - 4	32	17.37	1.1671E-06
	3 - 4	13	17.37	0.04829
	Tabela dos Agrupamentos			
	Avaliação	Soma (Rank)	Grupos	
	1	46	a	
	2	45	a	
	3	26	b	
	4	13	b	
	Avaliações Comparadas	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
CCA	1 - 2	17	17.37	0.00981
	1 - 3	22	17.37	0.00083
	1 - 4	39	17.37	3.132E-09
	2 - 3	5	17.37	0.44752
	2 - 4	22	17.37	0.00083
	3 - 4	17	17.37	0.00981
	Tabela dos Agrupamentos			
	Avaliação	Soma (Rank)	Grupos	
	1	52	a	
	2	35	a	
	3	30	ab	
	4	13	b	

Tabela 20. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para massa de cerejeira sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.

	Avaliações Comparadas	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
Sem tratamento	1 - 2	23	17.37	0.00048
	1 - 3	10	17.37	0.12874
	1 - 4	15	17.37	0.02269
	2 - 3	13	17.37	0.04829
	2 - 4	38	17.37	7.8051E-09
	3 - 4	25	17.37	0.00015
	Tabela dos Agrupamentos			
	Avaliação	Soma (Rank)	Grupos	
	2	51	a	
	3	38	a	
	1	28	ab	
	4	13	bc	
	Avaliações Comparadas	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
CCA	1 - 2	21	17.37	0.00142
	1 - 3	18	17.37	0.00625
	1 - 4	13	17.37	0.04829
	2 - 3	3	17.37	0.64858
	2 - 4	34	17.37	2.4048E-07
	3 - 4	31	17.37	2.4864E-06
	Tabela dos Agrupamentos			
	Avaliação	Soma (Rank)	Grupos	
	2	47	a	
	3	44	a	
	1	26	b	
	4	13	b	

Tabela 21. Análise descritiva da velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de sumaúma sem tratamento e tratada com CCA em campo de apodrecimento.

Tratamento	Avaliação	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)	Mínimo	Máximo
Sem tratamento	1	1284.69	212.54	16.54	901.78	1502.77
	2	1176.05	299.85	25.50	601.57	1461.47
	3	1087.68	245.83	22.60	597.58	1428.97
	4	-	-	-	-	-
CCA	1	1205.76	131.61	10.92	979.48	1437.54
	2	1190.08	127.72	10.73	990.93	1456.33
	3	1231.91	128.89	10.46	987.43	1426.82
	4	1369.86	166.47	12.15	1025.43	1609.89

Tabela 22. Análise descritiva da velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de marupá sem tratamento e tratada com CCA em campo de apodrecimento.

Tratamento	Avaliação	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)	Mínimo	Máximo
Sem tratamento	1	1458.07	140.34	9.63	1181.14	1643.52
	2	1411.81	140.86	9.98	1135.83	1608.58
	3	1388.77	142.69	10.27	1109.47	1576.95
	4	1281.66	115.11	8.98	1023.21	1551.64
CCA	1	1454.85	63.06	4.33	1364.38	1598.77
	2	1474.48	77.69	5.27	1339.35	1626.79
	3	1477.09	78.52	5.32	1314.70	1600.35
	4	1633.12	89.94	5.51	1507.02	1835.40

Tabela 23. Análise descritiva da velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de curupixá sem tratamento e tratada com CCA em campo de apodrecimento.

Tratamento	Avaliação	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)	Mínimo	Máximo
Sem tratamento	1	1708.05	121.73	7.13	1500.82	1865.67
	2	1568.13	173.01	11.03	1228.72	1767.60
	3	1553.34	142.03	9.14	1261.07	1763.15
	4	1576.04	156.80	9.95	1285.28	1793.53
CCA	1	1626.53	136.37	8.38	1365.85	1782.99
	2	1619.47	121.28	7.49	1402.45	1781.04
	3	1614.28	120.44	7.46	1368.16	1722.34
	4	1799.99	134.90	7.49	1567.10	1965.41

Tabela 24. Análise descritiva da velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de cerejeira sem tratamento e tratada com CCA em campo de apodrecimento.

Tratamento	Avaliação	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)	Mínimo	Máximo
Sem tratamento	1	1585.68	77.42	4.88	1456.13	1706.80
	2	1523.15	76.24	5.01	1395.22	1644.67
	3	1518.58	87.63	5.77	1378.05	1655.21
	4	1653.00	70.85	4.29	1521.61	1766.66
CCA	1	1486.61	42.41	2.85	1412.84	1552.86
	2	1457.20	46.21	3.17	1372.94	1513.30
	3	1468.55	60.50	4.12	1350.44	1537.04
	4	1591.28	56.40	3.54	1502.22	1702.88

Tabela 25. Teste de Friedman para efeito do tratamento com CCA na velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de sumaúma nos sentidos transversal (TR) e longitudinal (LL).

	Informação	Valor
TR	Friedman qui-quadrado	0.6923
	Graus de Liberdade	1
	P-valor	0.4054
LL	Friedman qui-quadrado	13
	Graus de Liberdade	1
	P-valor	3.1149E-04

Tabela 26. Teste de Friedman para efeito do tratamento com CCA na velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de marupá nos sentidos transversal (TR) e longitudinal (LL).

	Informação	Valor
TR	Friedman qui-quadrado	13
	Graus de Liberdade	1
	P-valor	3.1149E-04
LL	Friedman qui-quadrado	13
	Graus de Liberdade	1
	P-valor	3.1149E-04

Tabela 27. Teste de Friedman para efeito do tratamento com CCA na velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de curupixá nos sentidos transversal (TR) e longitudinal (LL).

	Informação	Valor
TR	Friedman qui-quadrado	13
	Graus de Liberdade	1
	P-valor	3.1149E-04
LL	Friedman qui-quadrado	13
	Graus de Liberdade	1
	P-valor	3.1149E-04

Tabela 28. Teste de Friedman para efeito do tratamento com CCA na velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de cerejeira nos sentidos transversal (TR) e longitudinal (LL).

	Informação	Valor
TR	Friedman qui-quadrado	13
	Graus de Liberdade	1
	P-valor	3.1149E-04
LL	Friedman qui-quadrado	9.3077
	Graus de Liberdade	1
	P-valor	2.2819E-03

Tabela 29. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para efeito do tratamento com CCA na velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de sumaúma nos sentidos transversal (TR) e longitudinal (LL).

	Tratamentos Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
TR	1 - 2	3	7.07	0.4054
	Tabela dos Agrupamentos			
	Tratamento	Soma (Rank)	Grupos	
	1	21	a	
	2	18	a	
	Tratamentos Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
LL	1 - 2	13	7.07	0.0003
	Tabela dos Agrupamentos			
	Tratamento	Soma (Rank)	Grupos	
	1	26	a	
	2	13	b	

Tabela 30. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para efeito do tratamento com CCA na velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de marupá nos sentidos transversal (TR) e longitudinal (LL).

	Tratamentos Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
TR	1 - 2	13	7.07	0.0003
	Tabela dos Agrupamentos			
	Tratamento	Soma (Rank)	Grupos	
	1	26	a	
	2	13	b	
	Tratamentos Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
LL	1 - 2	13	7.07	0.0003
	Tabela dos Agrupamentos			
	Tratamento	Soma (Rank)	Grupos	
	1	26	a	
	2	13	b	

Tabela 31. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para efeito do tratamento com CCA na velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de curupixá nos sentidos transversal (TR) e longitudinal (LL).

	Tratamentos Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
TR	1 - 2	13	7.07	0.0003
	Tabela dos Agrupamentos			
	Tratamento	Soma (Rank)	Grupos	
	1	26	a	
	2	13	b	
	Tratamentos Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
LL	1 - 2	13	7.07	0.0003
	Tabela dos Agrupamentos			
	Tratamento	Soma (Rank)	Grupos	
	1	26	a	
	2	13	b	

Tabela 32. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para efeito do tratamento com CCA na velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de cerejeira nos sentidos transversal (TR) e longitudinal (LL).

	Tratamentos Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
TR	1 - 2	13	7.07	0.0003
	Tabela dos Agrupamentos			
	Tratamento	Soma (Rank)	Grupos	
	1	26	a	
	2	13	b	
	Tratamentos Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
LL	1 - 2	11	7.07	0.0023
	Tabela dos Agrupamentos			
	Tratamento	Soma (Rank)	Grupos	
	1	25	a	
	2	14	b	

Tabela 33. Teste de Friedman para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de sumaúma em relação ao tratamento químico.

Informação	Valor
Friedman qui-quadrado	0.33333
Graus de Liberdade	1
P-valor	0.56370

Tabela 34. Teste de Friedman para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de marupá em relação ao tratamento químico.

Informação	Valor
Friedman qui-quadrado	1
Graus de Liberdade	1
P-valor	0.31731

Tabela 35. Teste de Friedman para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de curupixá em relação ao tratamento químico.

Informação	Valor
Friedman qui-quadrado	1
Graus de Liberdade	1
P-valor	0.31731

Tabela 36. Teste de Friedman para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de cerejeira em relação ao tratamento químico.

Informação	Valor
Friedman qui-quadrado	4
Graus de Liberdade	1
P-valor	0.04550

Tabela 37. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de sumaúma sem tratamento (1) e tratadas com CCA (2).

Tratamentos Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
1 - 2	1	3.39	0.5637
Tabela dos Agrupamentos			
Tratamento	Soma (Rank)	Grupos	
2	5	a	
1	4	a	

Tabela 38. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de marupá sem tratamento (1) e tratadas com CCA (2).

Tratamentos Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
1 - 2	2	3.92	0.3173
Tabela dos Agrupamentos			
Tratamento	Soma (Rank)	Grupos	
2	7	a	
1	5	a	

Tabela 39. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de curupixá sem tratamento (1) e tratadas com CCA (2).

Tratamentos Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
1 - 2	2	3.92	0.3173
Tabela dos Agrupamentos			
Tratamento	Soma (Rank)	Grupos	
2	7	a	
1	5	a	

Tabela 40. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de cerejeira sem tratamento (1) e tratadas com CCA (2).

Tratamentos Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
1 - 2	4	3.92	0.0455
Tabela dos Agrupamentos			
Tratamento	Soma (Rank)	Grupos	
1	8	a	
2	4	b	

Tabela 41. Teste de Friedman para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de sumaúma sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.

	Informação	Valor
Sem tratamento	Friedman qui-quadrado	3.2308
	Graus de Liberdade	2
	P-valor	0.1988
CCA	Friedman qui-quadrado	25.9846
	Graus de Liberdade	3
	P-valor	9.6084E-06

Tabela 42. Teste de Friedman para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de marupá sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.

	Informação	Valor
Sem tratamento	Friedman qui-quadrado	25.1538
	Graus de Liberdade	3
	P-valor	1.4338E-05
CCA	Friedman qui-quadrado	25.3385
	Graus de Liberdade	3
	P-valor	1.3118E-05

Tabela 43. Teste de Friedman para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de curupixá sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.

	Informação	Valor
Sem tratamento	Friedman qui-quadrado	18.5077
	Graus de Liberdade	3
	P-valor	0.00035
CCA	Friedman qui-quadrado	24.60
	Graus de Liberdade	3
	P-valor	1.8718E-05

Tabela 44. Teste de Friedman para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de cerejeira sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.

	Informação	Valor
Sem tratamento	Friedman qui-quadrado	35.1231
	Graus de Liberdade	3
	P-valor	1.1474E-07
CCA	Friedman qui-quadrado	32.3538
	Graus de Liberdade	3
	P-valor	4.4076E-07

Tabela 45. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de sumaúma sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.

	Avaliações Comparadas	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
Sem tratamento	1 - 2	6	12.21	0.2393
	1 - 3	9	12.21	0.0776
	2 - 3	3	12.21	0.5563
	Tabela dos Agrupamentos			
	Avaliação	Soma (Rank)	Grupos	
	1	31	a	
2	25	a		
3	22	a		
	Avaliações Comparadas	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
CCA	1 - 2	8	17.37	0.2243
	1 - 3	2	17.37	0.7613
	1 - 4	24	17.37	0.0003
	2 - 3	10	17.37	0.1287
	2 - 4	32	17.37	1.1671E-06
	3 - 4	22	17.37	0.0008
	Tabela dos Agrupamentos			
	Avaliação	Soma (Rank)	Grupos	
4	52	a		
3	30	b		
1	28	b		
2	20	b		

Tabela 46. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de marupá sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.

	Avaliações Comparadas	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
Sem tratamento	1 - 2	13	17.37	0.0483
	1 - 3	21	17.37	0.0014
	1 - 4	32	17.37	1.1671E-06
	2 - 3	8	17.37	0.2243
	2 - 4	19	17.37	0.0039
	3 - 4	11	17.37	0.0947
	Tabela dos Agrupamentos			
	Avaliação	Soma (Rank)	Grupos	
	1	49	a	
	2	36	a	
	3	28	ab	
	4	17	b	
	Avaliações Comparadas	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
CCA	1 - 2	6	17.37	0.3621
	1 - 3	9	17.37	0.1716
	1 - 4	31	17.37	2.4864E-06
	2 - 3	3	17.37	0.6486
	2 - 4	25	17.37	0.0001
	3 - 4	22	17.37	0.0008
	Tabela dos Agrupamentos			
	Avaliação	Soma (Rank)	Grupos	
	4	52	a	
	3	30	b	
	2	27	b	
	1	21	b	

Tabela 47. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de curupixá sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.

	Avaliações Comparadas	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
Sem tratamento	1 - 2	24	17.37	0.0003
	1 - 3	25	17.37	0.0001
	1 - 4	17	17.37	0.0098
	2 - 3	1	17.37	0.8793
	2 - 4	7	17.37	0.2876
	3 - 4	8	17.37	0.2243
	Tabela dos Agrupamentos			
	Avaliação	Soma (Rank)	Grupos	
	1	49	a	
	4	32	b	
	2	25	b	
	3	24	b	
	Avaliações Comparadas	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
CCA	1 - 2	2	17.37	0.7613
	1 - 3	5	17.37	0.4475
	1 - 4	25	17.37	0.0001
	2 - 3	7	17.37	0.2876
	2 - 4	23	17.37	0.0005
	3 - 4	30	17.37	0.0000
	Tabela dos Agrupamentos			
	Avaliação	Soma (Rank)	Grupos	
	4	52	a	
	2	29	b	
	1	27	b	
	3	22	b	

Tabela 48. Teste de comparações múltiplas de Bonferroni para velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira de cerejeira sem tratamento e tratadas com CCA em relação aos períodos de avaliação em campo de apodrecimento.

	Avaliações Comparadas	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
Sem tratamento	1 - 2	20	17.37	0.0024
	1 - 3	19	17.37	0.0039
	1 - 4	13	17.37	0.0483
	2 - 3	1	17.37	0.8793
	2 - 4	33	17.37	5.3571E-07
	3 - 4	32	17.37	0.0000012
	Tabela dos Agrupamentos			
	Avaliação	Soma (Rank)	Grupos	
	4	52	a	
	1	39	a	
	3	20	b	
	2	19	b	
	Avaliações Comparadas	Diferença Observada	Diferença Crítica	P-valor
CCA	1 - 2	19	17.37	0.0039
	1 - 3	14	17.37	0.0334
	1 - 4	15	17.37	0.0227
	2 - 3	5	17.37	0.4475
	2 - 4	34	17.37	2.4048E-07
	3 - 4	29	17.37	1.0558E-05
	Tabela dos Agrupamentos			
	Avaliação	Soma (Rank)	Grupos	
	4	52	a	
	1	37	a	
	3	23	ab	
	2	18	b	