

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CAMPUS DE DRACENA

Elis Maria do Nascimento

Uso de Redes Neurais Artificiais – *Self Organizing Map* na seleção de genótipos de *Eucalyptus* spp. produzidos em diferentes recipientes de produção

Dracena
2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CAMPUS DE DRACENA

Elis Maria do Nascimento

Uso de Redes Neurais Artificiais – *Self Organizing Map* na seleção de genótipos de *Eucalyptus* spp. produzidos em diferentes recipientes de produção.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas – Unesp, Câmpus de Dracena como parte das exigências para graduação em Engenharia Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. Vitor Corrêa de Mattos Barretto

Coorientador: Prof. Dr. Rafael Simões Tomaz

Dracena
2024



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Dracena



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
UNESP – CÂMPUS DE DRACENA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: "Uso de Redes Neurais Artificiais – Self Organizing Map na seleção de genótipos de *Eucalyptus* spp. produzidos em diferentes recipientes de produção"

Modalidade: Trabalho de **Atividades de pesquisa**

Autor: Elis Maria do Nascimento

Orientador (a): Dr. Vitor Corrêa de Mattos Barretto

Co-orientador(es): Dr. Rafael Simões Tomaz

Número de Créditos: 12

Data da aprovação e correção de acordo com as sugestões da Banca: 07/06/2024

Dr. Rafael S. Tomaz

Dr. Sérgio B. Ramos



Documento assinado digitalmente
MELISSA ALEXANDRE SANTOS
Data: 10/06/2024 23:37:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Melissa A. Santos

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Elis Maria do Nascimento, nascida em 29 de Dezembro de 1995, na cidade de São Paulo - SP. Iniciou a graduação em Engenharia Agrônômica no ano de 2020, na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, na Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas (FCAT), localizada no município de Dracena/SP. Foi integrante do Centro de Estudos de Biometria Aplicada a Fitotecnia de 2020 a 2024, onde desenvolveu atividades de pesquisa; em 2021 foi bolsista do Conselho de desenvolvimento Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), na iniciação científica intitulada “Pipeline para avaliação de imagens e seleção de genótipos do eucalipto utilizando Redes Neurais Artificiais”; no ano seguinte, realizou iniciação científica sem bolsa (ICSB), na iniciação científica “Efeito de Macro e Micronutrientes em *Eucalyptus* spp. em diferentes recipientes de cultivo”. No ano de 2023, foi bolsista CNPq no trabalho “Efeito da fertilização com micronutrientes no desenvolvimento inicial de mudas de *Eucalyptus* spp. produzidas em tubetes convencionais e Berço Germinador Compostável - BGC e seu desempenho em campo”. Ao longo da graduação, participou do projeto de extensão no Cursinho pré-vestibular Alvo - UNESP Dracena onde foi professora colaboradora (2021-2022), além de ter atuado como representante discente no Comitê Local de Permanência Estudantil - CLPE (2021/2022 e 2023/2024). Foi bolsista no Comitê Local de Ações Culturais (2023) e, ainda no mesmo ano, foi colaboradora fundadora do Diretório Acadêmico “Maria Luiza Piatti”, no cargo de representante do Curso de Engenharia Agrônômica. Recebeu título honorífico alcançando o 1 lugar entre os trabalhos mais bem avaliados no evento de extensão intitulado “1 Rally de Ideias”, promovido pelo Celeiro de Ideias. Foi integrante da comissão organizadora do evento de extensão intitulado “VI Expedição de Engenharia Agrônômica”, realizado nas propriedades, institutos de pesquisa e empresas agropecuárias em 2023.

DEDICATÓRIA

À minha amada mãe, Mônica Maria da Conceição (in memoriam), que dedicou sua vida com muito amor e trabalho pelos filhos, deixando exemplo inspirador de mulher guerreira e generosa. Todo meu amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Para a elaboração deste trabalho foram responsáveis diversas pessoas e iniciativas, que possibilitaram a minha formação como ser humano, bem como o privilégio de conclusão do curso em Engenharia Agrônômica em uma das melhores universidades do país.

Agradeço a Deus, por iluminar os meus caminhos e me conceder saúde, por todo o amparo nos momentos difíceis, principalmente durante essa jornada, longe de entes queridos e diante a grandes perdas. Sou grata pela oportunidade de cursar em uma universidade pública e de qualidade.

À minha amada mãe, Mônica Maria da Conceição (*in memoriam*), que com muita dedicação, força e amor incondicional, muito fez por mim durante a sua vida. Pôde me proporcionar educação e nunca mediu esforços para que eu pudesse realizar os meus sonhos. Apesar da sua partida precoce, fui privilegiada em ter uma mãe generosa, batalhadora e amorosa. Sempre será a minha maior fonte de inspiração.

À minha irmã Gabriela, por todo amor, apoio e incentivo, desde o seu nascimento, me ensina muito sobre o amor fraterno, nunca soltou a minha mão independente de qualquer situação e recentemente me presenteou com a minha sobrinha Diana.

Ao meu pai, Eliel Ferreira do Nascimento e ao meu irmão Felipe, agradeço o incentivo em minhas decisões.

Ao meu noivo, Boniek por todo companheirismo e incentivo. Caminhou comigo durante toda essa jornada e com muito carinho, me ensina diariamente sobre paciência e respeito, mesmo com a distância física, se faz muito presente em meus dias.

Aos meus avós Marinalva e Manuel e as minhas tias, Débora e Sandra, e minha prima Sophia, por todo amor e compreensão diante a distância.

Aos meus padrinhos, Cleo e Nério, agradeço todo o acolhimento e carinho, se fizeram muito presentes principalmente diante a perda de minha mãe.

Aos meus amigos de infância Gi, Augusto, Sabrina e seus pais, Elaine e Nido, que me acompanham há mais de 20 anos, seguem me incentivando e me inspirando, deixando a vida mais leve com essa amizade tão bonita.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Rafael Simões Tomaz, por todos os ensinamentos, por constantemente me incentivar a superar as barreiras, agradeço toda a paciência e confiança depositada, agradeço as oportunidades de bolsas de iniciações científicas que foram fundamentais para a minha permanência durante a graduação. Me sinto inspirada e grata por esses cinco anos de muito trabalho e orientação.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Vitor Corrêa de Mattos Barretto, que com ideias inspiradoras, pôde contribuir com excelência na qualidade deste trabalho. Sou grata pelos ensinamentos e incentivos.

Em especial, deixo minha admiração à Profa. Dra. Pâmela Gomes Nakada, sendo uma fonte de inspiração, sou grata por todos os ensinamentos valiosos, dentro e fora da sala de aula.

Ao Centro de Estudos de Biometria aplicado à Fitotecnia - CEBAF e seus participantes, que colaboraram nas minhas pesquisas, Silas, João, Vitória, Arthur e Daniel, agradeço a ajuda que me ofertaram.

Ao Núcleo de Estudos e Experimentação Florestal - Neeflor e ao Professor Vitor por todo o suporte durante a execução dos projetos de iniciação científica.

À república Ohana, minha morada durante o período de graduação em Dracena, que com muito acolhimento, me proporcionou ótimas experiências, principalmente ao lado da Thamires, Aniele, Beatriz, Mariana.

Aos meus colegas de classe cuja contribuição foi fundamental para a minha formação, em especial ao João, Vinicius e Silas, que me acompanharam durante essa jornada acadêmica.

À coordenadoria de Permanência Estudantil (COPE-Unesp), que viabilizou a minha permanência durante toda a graduação e desempenha um papel fundamental na vida dos estudantes em situação de vulnerabilidade socioeconômica.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo fomento à pesquisa nacional e pelo financiamento dos projetos de iniciação científica executados durante a graduação.

Ao Cursinho pré-vestibular Alvo da Unesp de Dracena, que desempenha um papel social importante na vida dos futuros ingressantes no ensino superior, o qual pude aprender muito desempenhando o papel de docente na disciplina de Geografia Geral.

Por fim, à Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas (FCAT/Unesp), pelo ensino de qualidade e excelente corpo de docentes, técnicos administrativos, técnicos de laboratório e técnicos de campo, que com muito trabalho e conhecimento, proporcionam condições para os processos de transformações sociais e profissionais.

“Coração de estudante,
E há que se cuidar da vida
E há que se cuidar do mundo
Tomar conta da amizade
Alegria e muito sonho
Espalhadas no caminho
Verdes: planta e sentimento
Folhas: coração, juventude e fé”. – Milton Nascimento.

RESUMO

O *Eucalyptus spp.* desempenha um papel fundamental no Brasil, sendo uma das principais espécies que compõem as florestas plantadas no país. Embora o uso de recipientes de fontes não renováveis ainda seja predominante na produção de mudas florestais, novas alternativas que minimizem os impactos ambientais gerados têm sido amplamente estudadas. Concomitantemente a isso, a inteligência artificial está cada vez mais presente na agricultura, especialmente no setor florestal, sendo utilizada na identificação de incêndios, medição de volume, diâmetro e altura, detecção de doenças e avaliação da diversidade genética. Nesse sentido, as Redes Neurais Artificiais, em particular, demonstram uma notável capacidade de ajuste e adaptação, possibilitando a análise e simulação de interações em sistemas complexos. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o desenvolvimento das mudas em diferentes recipientes de produção e estudar a diversidade genética visando selecionar os melhores genótipos de *Eucalyptus urograndis* e *Corymbia citriodora* utilizando redes neurais Self Organizing Map (SOM). As plantas provenientes de sementes, foram desenvolvidas em casa de vegetação e transplantadas para vasos. Foram realizadas as avaliações da altura de planta e medição da fluorescência da clorofila. O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 8x2 com 6 repetições. Na análise estatística, foram considerados modelos lineares e não lineares, e as espécies foram avaliadas separadamente. Os resultados indicaram que o uso dos recipientes SIS BGC® interferiu no desenvolvimento das mudas, afetando negativamente o crescimento das plantas. O estudo da divergência genética dentro das populações foi realizado por meio de cálculos da distância Euclidiana. Devido à complexidade e à experiência necessária para a interpretação dos resultados dos dendrogramas gerados, utilizamos as redes neurais SOM como método auxiliar nas avaliações. Em síntese, as redes neurais SOM permitiram a visualização e identificação de genótipos superiores com base nas características das plantas, além de facilitar a identificação dos melhores indivíduos, viabilizando a tomada de decisão na seleção para o cruzamento.

Palavras-chave: Melhoramento genético. Inteligência Artificial. Mapas auto-organizáveis. Sustentabilidade. Melhoramento do eucalipto.

ABSTRACT

Eucalyptus spp. plays a fundamental role in Brazil, being one of the main species composing the planted forests in the country. Although the use of containers from non-renewable sources still predominates in forest seedling production, new alternatives that minimize the environmental impacts generated have been widely studied. Concurrently with this, artificial intelligence is increasingly present in agriculture, especially in the forestry sector, being used in fire detection, volume measurement, diameter and height, disease detection, and evaluation of genetic diversity. In this sense, Artificial Neural Networks, in particular, demonstrate a remarkable capacity for adjustment and adaptation, enabling the analysis and simulation of interactions in complex systems. In this context, the objective of this study was to evaluate the development of seedlings in different production containers and to study genetic diversity in order to select the best *Eucalyptus urograndis* and *Corymbia citriodora* genotypes using Self Organizing Map (SOM) neural networks. Plants from seeds were developed in a greenhouse and transplanted to pots. Evaluations of plant height and chlorophyll fluorescence measurements were performed. The experiment was conducted in a completely randomized design, in an 8x2 factorial scheme with 6 repetitions. In the statistical analysis, linear and non-linear models were considered, and the species were evaluated separately. The results indicated that the use of SIS BGC® containers interfered with seedling development, negatively affecting plant growth. The study of genetic divergence within populations was conducted through Euclidean distance calculations. Due to the complexity and experience required for interpreting the results of the dendrograms generated, we used SOM neural networks as an auxiliary method in the evaluations. In summary, SOM neural networks allowed the visualization and identification of superior genotypes based on plant characteristics, as well as facilitating the identification of the best individuals, enabling decision-making in selection for crossing.

Keywords: Genetic improvement, Artificial intelligence, Self-Organizing Map, Sustainability, *Eucalyptus* improvement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Arquitetura de uma rede SOM Bidimensional	30
Figura 2 - Resultado do teste de Skott-Knott para agrupamento de médias de H avaliadas para os níveis do recipiente da espécie <i>C. citriodora</i>	39
Figura 3 - Resultado do teste de Skott-Knott para agrupamento de médias de Fv/Fm avaliadas para os níveis do fator tratamento foliar da espécie <i>C. citriodora</i>	Error!
Bookmark not defined.	
Figura 4 - Resultado do teste de Skott-Knott para agrupamento de médias de H avaliadas para os níveis do fator tratamento foliar, na espécie <i>E. urograndis</i>	41
Figura 5 - Resultado do teste de Skott-Knott para agrupamento de médias de Fv/Fm avaliadas para os níveis do fator tratamento foliar, na espécie <i>E. urograndis</i>	42
Figura 6 - Dendrograma para a população <i>E. urograndis</i> e <i>C. citriodora</i>	43
Figura 7 - Mapas auto-organizáveis (SOM) de Kohonen da espécie <i>E. urograndis</i> com divisão de 4 subpopuções baseadas no comportamento das características. (A) Diagrama em pizza evidenciando o comportamento das características no neurônio. (B) Densidade de indivíduos em cada neurônio.	44
Figura 8 - SOM da espécie <i>C. citriodora</i> com divisão de 5 subpopulações baseadas no comportamento das características. (A) Diagrama em pizza evidenciando o comportamento das características no neurônio. (B) Densidade de indivíduos em cada neurônio.	44
Figura 9 - SOM com identificação dos neurônios que apresentam os melhores indivíduos na população da espécie <i>E. urograndis</i> . Os neurônios circulados com correspondem aqueles onde se alocam os 10% melhores indivíduos selecionados para as respectivas características H e Fv/Fm.....	46

Figura 10 - SOM com identificação dos neurônios que apresentam os melhores indivíduos na população da espécie *C. citriodora*. Os neurônios circulados com correspondem aqueles onde se alocam os 10% melhores indivíduos selecionados para as respectivas características H e Fv/Fm.....46

LISTA DE FOTOS

Foto 1 - Diferentes recipientes de produção: (A) recipiente biocompostável SIS BGC®, (B) recipiente convencional	32
Foto 2 - Bandeja com recipiente convencional (A), estrutura elaborada para promover microclima no desenvolvimento inicial das plântulas (B).....	32
Foto 3 - Plantas após o desbaste (A), mudas descentralizadas (B).....	33
Foto 4 - Plantas retiradas dos recipientes convencionais no momento do plantio (A). Transplântio das mudas para vasos de 3,8 L (B)	33
Foto 5 - Mensuração da altura das plantas e fluorescência	35
Foto 6 - Plântulas sob ataque de formigas cortadeiras	35
Foto 7 - Controle da lagarta-das-folhas (<i>Spodoptera eridania</i>)	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação dos tratamentos	34
Tabela 2 - Análise descritiva das características avaliadas, considerando os fatores tratamento foliar e tipo de recipiente, na espécie <i>C. citriodora</i>	38
Tabela 3 - Resumo da ANOVA para as características avaliadas considerando os fatores de tratamento foliar e tipo de recipiente, na espécie <i>E. urograndis</i>	40

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANNs	Artificial Neural Networks
D1	Subunidade proteica que compõe o fotossistema II
DAS	Dias Após Semeadura
F0	Fluorescência basal
Fm	Fluorescência Máxima
Ft	Fluorescência total
Fv/Fm	Eficiência quântica potencial do FSII
H	Altura de planta
IA	Inteligência Artificial
IBA	Indústria Brasileira de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PSII	Fotossistema II
SIS BGC®	Sistema Inteligente Sustentável Berço Germinador Compostável
SOM	Self Organizing Map

SUMÁRIO

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS	16
SUMÁRIO.....	17
1 INTRODUÇÃO	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1. Características do <i>Eucalyptus</i> spp.....	19
2.1.1. Panorama econômico	21
2.1.2. Melhoramento genético no setor florestal	21
2.1.3. Diversidade genética no melhoramento	22
2.2. Nutrição de plantas	23
2.2.1 Fósforo	23
2.2.2 Silício.....	23
2.2.3 Bioativadores.....	24
2.3 Recipientes de produção.....	25
2.4 Fluorescência da Clorofila.....	26
2.5 Inteligência Artificial na Agricultura.....	28
2.5.1 Redes Neurais Artificiais e as redes auto-organizáveis de Kohonen (SOM)	29
3. MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1. Características da área.....	31
3.2. Recipientes	31
3.3 Mudas	31
3.4 Delineamento Experimental.....	34
3.4. Tratos Culturais.....	34
3.5 Análise dos Dados.....	36
3.5.1 ANOVA	36

3.5.2 Análise de diversidade por meio de método tradicional	36
3.5.3 Análise de diversidade pelo método SOM	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 ANOVA	38
4.2 Análise de Divergência	42
5 CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

O eucalipto é essencial no Brasil, sendo uma das principais espécies que compõem as florestas plantadas no país. Introduzido no início do século XX, tornou-se vital para a economia brasileira devido a sua alta taxa de crescimento e plasticidade. São fundamentais na indústria de papel, celulose, juntamente com a produção de produtos sólidos. Além disso, em termos ambientais, o eucalipto favorece significativamente na conservação das florestas nativas, da mesma forma, na preservação de solos. Somado a isso, as árvores de eucalipto apresentam um índice de crescimento elevado, o que as tornam eficientes no sequestro de carbono.

A agricultura moderna busca alternativas sustentáveis para mitigar efeitos de algumas práticas tradicionais não sustentáveis e contribuir com os objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU. Na produção de mudas de eucalipto, o uso de recipientes biocompostáveis, em vez de recipientes de polipropileno é uma opção que contribui para uma agricultura mais sustentável.

No que diz respeito às redes neurais artificiais, são modelos matemáticos inspirados no funcionamento do cérebro humano, capazes de aprender padrões e relações complexas através de treinamentos. Durante o treinamento, os pesos das conexões são ajustados para minimizar o erro. Uma vez treinadas, as redes podem realizar tarefas como classificação, regressão e reconhecimento de padrões. As redes SOM (*Self Organizing Map*) ou Redes de Kohonen são redes neurais que mapeia dados de alta dimensionalidade. São usadas principalmente para visualização e análise de dados, agrupamento e redução de dimensionalidade, aplicáveis em diversas áreas. Neste contexto, objetivou-se neste trabalho selecionar genótipos de *Eucalyptus* spp. produzidos em diferentes recipientes de produção, pelo método tradicional e por meio da inteligência artificial, com o uso de redes neurais artificiais *Self Organizing Map* (SOM).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Características do *Eucalyptus* spp.

Eucalyptus é um gênero de plantas da família Myrtaceae, originário do grego *Myrtos*, que significa perfume, e reúne espécies conhecidas pelo nome comum de eucalipto, que também é aplicado a outros gêneros de mirtáceas, como a *Corymbia* e *Angophora* (FLORES *et al.*, 2016). Atualmente, o gênero inclui mais de 700 espécies reconhecidas botanicamente. Apesar de oriundos da Oceania, mais especificamente da Austrália, o *Eucalyptus* spp. adaptou-se muito bem a diversas regiões do mundo, devido à sua alta plasticidade, alta taxa de crescimento e versatilidade. São árvores perenes e, na maioria das espécies, apresentam dimorfismo foliar quando jovens. Suas folhas são opostas, de ovais a arredondadas e, após dois anos de crescimento, as folhas passam a se desenvolver de forma alternada, no formato lanceolado e estreita (FLORES *et al.*, 2016). As flores de todas as espécies são hermafroditas, tendo como principais vetores de polinização os insetos. As espécies são preferencialmente alógamas, mas apresentam sistema reprodutivo misto, podendo apresentar 30% de autogamia (DE ASSIS, 1996). Seus frutos são lenhosos de formato ligeiramente cônico, possui válvula que se abre para dispersar as sementes.

O eucalipto foi introduzido no Brasil no início de XX, pelo pesquisador Navarro de Andrade, que estudou a espécie com o objetivo de viabilizar seu plantio em larga escala (MARTINI, 2004) visando, sobretudo, o fornecimento de madeira para a Companhia de Estrada de Ferro, em Jundiaí, no estado de São Paulo (VENTURINI *et al.*, 2014). Inicialmente, a cultura do eucalipto no Brasil foi impulsionada com a utilização da madeira como insumo energético, por meio da produção de carvão vegetal e do uso de lenha. Na década de 60, com o crescimento da silvicultura no país, o setor de pesquisa ao eucalipto começou a se consolidar e ganhar força, culminando na realização da Segunda Conferência Mundial de Eucalipto (DRUMOND, 2016). De acordo com os dados históricos do Balanço Energético Nacional (EPE, 2021), a partir da década de 70, com o aumento do incentivo ao uso de petróleo e seus derivados, principalmente nos setores industriais e de transporte, a madeira deixa de ser principal fonte de energia primária do Brasil, sendo gradativamente substituída pelos combustíveis fósseis e pela hidroeletricidade.

Segundo Foelkel (2005), a utilização do eucalipto para a produção de celulose foi iniciada nos anos 30, com 75% das fibras compostas pela espécie e o restante, de araucária, a produção foi conduzida pelas empresas como Matarazzo, Cícero e Prado, Melhoramento e Suzano, no entanto, somente em 1939, a Suzano lançou a primeira fábrica de papel branco com 100% de fibras de eucalipto (REZENDE; BORÉM; LEITE, 2022). No início dos anos 90, houve o segmento de produtos sólidos derivados do eucalipto, como painéis, laminados, aglomerados, compensados e móveis.

Com o avanço das pesquisas biotecnológicas na silvicultura ao longo dos anos, os plantios de clones de eucalipto conseguiram alcançar alta produtividade. Uma grande parte dos plantios são compostos por híbridos, resultantes de pesquisas de melhoramento genético, que buscam combinar as melhores características de diferentes locais (CRISMEIRE, 2014). Um dos aspectos mais marcantes do eucalipto é o rápido crescimento associado à capacidade edafobioclimática em diversas regiões, o que confere um elevado potencial econômico, propiciando uma grande aceitação no país, conforme evidenciado pelas extensas áreas ocupadas pela espécie.

A expansão das áreas de cultivo foi principalmente em áreas previamente antropizadas, substituindo pastos degradados (IBA, 2023). Em áreas de florestas plantadas, uma das funções fundamentais que o eucalipto desempenha é na recuperação de áreas degradadas, na proteção do solo e da água. Segundo De Amorim (2021), durante as chuvas, a vegetação, por meio de sua copa, reduz o impacto direto das gotas da chuva no solo, protegendo-os da erosão e, conseqüentemente, preservando os recursos hídricos próximos. Isso ocorre porque as partículas do solo carregadas pela enxurrada durante o processo de erosão são depositadas nos rios, resultando no assoreamento desses corpos d'água (MENDES *et al.*, 2022). Concomitantemente, ocorre a baixa concentração de gás carbônico quando comparada à ambientes com baixa densidade vegetativa, uma vez que a biomassa vegetal realiza fotossíntese, realizando o sequestro do CO₂ e devolvendo O₂ para o meio. De acordo com De Amorin *et al.*, (2022), um hectare de plantio de eucalipto pode armazenar 184 toneladas de CO₂ durante o ciclo de sete anos.

2.1.1. Panorama econômico

O Brasil é um dos maiores produtores de florestas plantadas no mundo, com cerca de 7,84 milhões de hectares, sendo 5,56 milhões de hectares compostas por florestas de eucalipto, representando 71,9% do total da área de florestas plantadas, as quais estão localizadas Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste (IBA, 2023). De acordo com os dados do IBGE, em 2022 o valor da produção florestal alcançou um recorde de R\$33,7 bilhões, representando um aumento de 11,9%, com produção em 4.884 municípios. A produção de florestas plantadas continua a superar a da extração vegetal e manteve a sua trajetória de crescimento dos últimos anos, atingindo um valor de R\$27,4 bilhões, sendo um aumento de 14,9% em relação ao registrado em 2021. O Brasil alcançou o primeiro lugar no ranking mundial de exportação de celulose, e a produção de madeira em tora para papel e celulose atingiu o pico nas exportações em 2022, totalizando 99,7 milhões de metros cúbicos (IBGE, 2022).

Nos anos em que o cenário pandêmico estava mais crítico, novos hábitos foram criados e perduram até os dias atuais, como as compras online e o delivery de alimentos, destacando as embalagens de papel no cotidiano do consumidor. Neste contexto, alternativas sustentáveis como o uso do papel ganharam ainda mais relevância. De acordo com IBA (2023), representam 34% do mercado e possuem uma alta taxa de reciclabilidade. 75,8 % de todo o papel para embalagem consumido no país foi reciclado.

2.1.2. Melhoramento genético no setor florestal

A definição do produto a ser obtido com o melhoramento é estabelecida com base na demanda pelo mercado consumidor (BORÉM, 2021). Nota-se que os produtos e os subprodutos obtidos a partir do eucalipto abrangem uma série de indústrias. Consequentemente, existem várias propriedades tecnológicas da madeira específica necessárias para atender as demandas de cada tipo de indústria, assegurando, assim, um suprimento adequado de matéria-prima que seja compatível com a finalidade a que se destina. Neste contexto, a integração entre tecnologias de melhoramento genético e as propriedades tecnológicas da madeira torna-se crucial.

Grattapaglia (2001) comenta sobre as expectativas de produtividades no setor florestal, com crescentes refinamentos na qualidade dos produtos de madeira por

meio de diversas técnicas de melhoramento e a seleção genética direcional. Nesse sentido, fez-se necessário estratégias para a manutenção da vantagem competitiva da indústria nacional de papel e celulose, sendo assim, os avanços da biologia computacional têm revolucionado profundamente as perspectivas e a velocidade de utilização do conhecimento biológico em algumas áreas da atividade econômica (GRATTAPAGLIA, 2001). Os progressivos resultados na produtividade das florestas de eucalipto verificado nos últimos anos estão diretamente ligados aos avanços dos materiais genéticos de maior potencial produtivo, especialmente devido ao aprimoramento da hibridação e clonagem, bem como ao desenvolvimento contínuo das técnicas de manejo florestal (DE SÁ; TAMBARUSSI, 2023). Atualmente, há uma gama de tecnologias cada vez mais avançadas, eficazes e precisas para gerar, analisar e interpretar em paralelo grandes quantidades de dados. Essas tecnologias, quando combinadas com os princípios e estratégias da genética clássica e da genética quantitativa, proporcionam perspectivas de grande potencial para acelerar os avanços nas gerações de melhoramento de espécies florestais, resultando em impactos significativos diretos nos ganhos de produtividade e qualidade por unidade de tempo (GRATTAPAGLIA, 2001).

2.1.3. Diversidade genética no melhoramento

No melhoramento genético, o processo de avaliação da diversidade genética constitui uma etapa do pré-melhoramento visando a construção das populações base de trabalho. Tal análise auxilia na “montagem” das populações; ou ainda na identificação de genitores adequados para produzir híbridos com efeito heterótico máximo e que permitam uma ampla segregação quando no processo de recombinação, facilitando o surgimento de características transgressivas (CRUZ, 2020).

Dessa forma, o conhecimento do grau de variabilidade genética, por meio dos estudos da divergência genética, torna-se vantajoso no processo de identificação de novas fontes de genes de interesse (AMARAL; JÚNIOR; THIÉBAUT, 1999). A identificação se baseia na observação das características manifestadas, aplicando métodos da genética biométrica. Segundo Kurosawa *et al.* (2005), em estudos de divergência genética, a técnica de análise multivariada tais como componentes principais, variáveis cônicas e métodos de aglomeração têm sido empregadas tanto

para variáveis quantitativas quanto qualitativas. Assim, para realizar essa tarefa, utiliza-se métodos de agrupamento ou de projeções de distâncias em gráficos bi ou tridimensionais (CRUZ, 2016)

2.2. Nutrição de plantas

A obtenção de plantios florestais com alto rendimento depende da adubação balanceada das mudas em fase de viveiro e início de desenvolvimento, após o plantio no campo. Uma vez que atendidas as necessidades nutricionais, o estabelecimento e crescimento inicial são otimizados, resultando na máxima manifestação do potencial de desenvolvimento da espécie (MAEDA *et al.*, 2012).

2.2.1 Fósforo

O plantio de eucalipto no Brasil é predominantemente realizado em solos de baixa aptidão agrícola. Nesses solos, os teores de alumínio são elevados, o que não constitui uma limitação para o cultivo do eucalipto, visto que a maioria das espécies é tolerante a este elemento (MAEDA *et al.*, 2012).

Entre os minerais que influenciam na qualidade e desenvolvimento do eucalipto e outras espécies de plantas, está o fósforo, sendo o nutriente que atua como componente estrutural das membranas celulares, bem como fazendo parte dos compostos responsáveis pela fixação do CO₂ atmosférico e pelo metabolismo de açúcares. Os solos brasileiros são deficientes em fósforo, o que torna necessário a utilização de fertilizantes para suprir a deficiência. A exigência de P pelo eucalipto é alta no ano de implantação e diminui com o aumento da idade. Em razão disso, o nível crítico de P no solo é alto na fase inicial de desenvolvimento, diminuindo nas fases de manutenção da floresta (DIAS, 2017).

2.2.2 Silício

O silício é considerado um elemento benéfico no desenvolvimento das plantas, pois ele proporciona melhoria no estado nutricional das plantas, reduzindo a toxicidade causada por outros nutrientes como o ferro, o manganês, o alumínio e o sódio, além de proporcionar uma redução na taxa de transpiração e atuar no controle de doenças na planta (LIMA FILHO *et al.*, 1999). O silício é absorvido pelas raízes das plantas na forma neutra, como ácido monossilícico (H₄SiO₄), via xilema através de transportadores de membrana específicos, sendo regulado pela transpiração

(RODRIGUES *et al.*, 2011). Após a absorção do ácido monossilícico, ele é depositado na forma de sílica polimerizada principalmente nas paredes das células epidérmicas do caule e das folhas, conferindo proteção às plantas e amenizando os efeitos de estresses de natureza biótica e abiótica (BOTELHO *et al.*, 2005), sendo encontrada em menores quantidades nas sementes e raízes (SANGSTER *et al.*, 2001). A movimentação do silício na planta depende de sua concentração na solução do solo e da espécie da planta. O silício absorvido pelas plantas é facilmente translocado no xilema e tem tendência natural a se polimerizar associando-se a compostos orgânicos como proteínas, polissacarídeos e lignina (EPSTEIN, 1994). Sua distribuição está relacionada com a taxa transpiratória das partes da planta.

Cacique *et al.* (2013) citam que o fornecimento de Si para plantas de arroz, tanto na forma solúvel aplicada nas raízes ou a sua pulverização sobre a parte aérea, pode aumentar a resistência das plantas ao ataque de fungos. De acordo com Pinto *et al.* (2009), a adição do Si ameniza o efeito negativo de metais pesados como, por exemplo, o excesso de Zn sobre o crescimento de plantas de *Eucalyptus urophylla* e proporciona uma utilização mais eficiente de P, Ca, Mg e S por estas plantas. É importante ressaltar que a resposta do eucalipto ao silício pode variar dependendo da variedade, das condições de cultivo e do manejo adotado. Existem diversas informações sobre o comportamento do Si em plantas, com maior ênfase no crescimento e produtividade de gramíneas, e de forma semelhante, para legumes e cereais de grande importância econômica. Contudo, poucos esforços têm sido realizados às espécies florestais, como é o caso do eucalipto (CARVALHO *et al.*, 2003).

2.2.3 Bioativadores

Os bioativadores são misturas de reguladores vegetais, associados a nutrientes, vitaminas, aminoácidos ou resíduos diversos. São denominados assim devido à presença nesses produtos de substâncias que são capazes de melhorar a atividade metabólica das plantas e possibilitando melhor desenvolvimento das plantas (DIAS, 2021). A utilização de produtos que possuem o efeito de bioativadores ou atenuadores de estresses causados por fatores abióticos são muito prósperos, tendo em vista que esses produtos possuem substâncias que promovem o enraizamento, como hormônios e ácidos orgânicos ou micronutrientes (CRUZ, 2023). Os

bioativadores podem ser aplicados de diferentes formas, como por exemplo, no tratamento de sementes ou via foliar.

2.3 Recipientes de produção

Os plásticos são utilizados, praticamente, em todas as atividades humanas, o que tem evidenciado um grande problema ambiental, pois o plástico possui resistência à biodegradação natural (VERT *et al.*, 2002 apud LINHARES, 2016). Os plásticos não renováveis apresentam um período de decomposição total superior a 100 anos e, por possuir alta massa molar média e hidrofobicidade, são responsáveis por impedir a ação dos microrganismos e suas enzimas na superfície do polímero (CHIELLINI e SOLARO, 1998 apud FABRO *et al.*, 2007). Os polímeros têm sido utilizados na agricultura desde meados do século passado. O uso de plásticos na agricultura foi introduzido principalmente nos países desenvolvidos, mas foi recentemente estendido para países em subdesenvolvimento. Os recipientes mais utilizados em produção de mudas de eucalipto são os tubetes de 55 cm³, que têm melhor aceitação no mercado, uma vez que permitem o acondicionamento de um grande número de mudas e automatização do sistema de produção. Esses tubetes possuem estrias internas que conduzem as raízes, impedindo seu enovelamento, situação frequente quando se utiliza o saco plástico (FREITAS *et al.*, 1993). Para Gomes e Paiva (2006), a qualidade e os custos da produção de mudas estão diretamente relacionados ao tipo de recipiente e seus respectivos volumes que, conseqüentemente, influenciam na qualidade de água e nutrientes ofertados às plantas, bem como na arquitetura do sistema radicular. Freitas *et al.* (1993) considera que a responsabilidade com o uso da água, a elevada demanda por produtos madeireiros e a evolução de plantios florestais em áreas de restrições hídricas acentuadas, justifica avaliar a utilização de tubetes de maiores dimensões para a produção de mudas de eucalipto.

Com a crescente preocupação com o desenvolvimento sustentável e as metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2024), as comunidades científicas têm se dedicado à pesquisa e desenvolvimento de alternativas sustentáveis, como no emprego de novos recipientes, especialmente recipientes biodegradáveis. Na área florestal, os tubetes biodegradáveis podem ser uma alternativa em substituição aos “balainhos” oriundos dos sacos plásticos e dos tubetes convencionais. Os plásticos biodegradáveis possuem um diferencial, pois logo após a sua vida útil são

incorporados ao solo e assimilados por microrganismos. Dessa forma, retornam ao ecossistema natural sem causar algum tipo de poluição e danos ao meio ambiente (NARAYAN, 2001; STEVENS, 2002 apud DIAS, 2011). Esses materiais precisam manter as suas propriedades físicas e mecânicas, enquanto em uso, no entanto, é necessário que sejam compostáveis ou biodegradáveis por microrganismos (bactérias, fungos e algas) em dióxido de carbono ou metano, e por água e biomassa apenas no final da sua vida. Além disso, esses recipientes não podem apresentar toxicidade (FEUILLOLEY *et al.*, 2005; VOX apud SCHETTINI, 2007).

Além dos benefícios ambientais, as vantagens desse tipo de tubete em relação ao tradicional seriam relacionadas à diminuição de custos com mão de obra e materiais, tanto no viveiro quanto no campo, não havendo a necessidade de retirada das mudas deles antes do plantio, nem retorno dos tubetes ao viveiro. Outra vantagem é a menor necessidade de espaço para armazenamento, não gerando resíduos e melhor conformação do sistema radicular, uma vez que as raízes não seriam todas direcionadas para a base do tubete. Wendling e Dutra (2021) afirmam que as mudas produzidas em recipientes biodegradáveis apresentam melhor desempenho de crescimento no campo, com menor deformação das raízes, quando comparadas com mudas produzidas em tubetes plásticos. Como desvantagem dos tubetes biodegradáveis, os autores citam a necessidade de serem diferenciados para distintos tempos de produção de mudas, variável em função de espécies e condições de manejo.

2.4 Fluorescência da Clorofila

O monitoramento experimental da condição fisiológica das plantas *in vivo*, constitui um desafio relevante para o melhoramento visando resistência a estresses ambientais. Goltsev *et al.* (2016) citam que existem meios para avaliar as condições fisiológicas das plantas, sua viabilidade e a ocorrência de estresse de intensidade variável, sendo fundamentais na detecção das respostas das plantas aos fatores de estresse e na avaliação da capacidade das plantas de sobreviver em condições ambientais adversas.

A fluorescência da clorofila fornece um método altamente sensível *in vivo* para avaliar as alterações gerais no estado fisiológico das plantas. As mudanças na fluorescência estão intimamente associadas, direta ou indiretamente, a todas as etapas das reações luminosas fotossintéticas. Medições da fluorescência foram

aplicadas na prática agrícola, como na fruticultura e silvicultura, para avaliar a qualidade de sementes, estudos ambientais, cultivo de culturas e prever os rendimentos das culturas em condições adversas (GOLTSEV *et al.*, 2016).

Maxwell e Johnson (2002) relatam que a energia luminosa absorvida pelas moléculas da clorofila numa folha pode seguir um de três destinos: primeiro, impulsionar a fotossíntese (fotoquímica); segundo o excesso de energia pode ser dissipado como calor; terceiro, pode ser reemitido como luz – fluorescência da clorofila. Os autores concluem ainda que esses três processos ocorrem em competição, deste modo, o aumento na eficiência de um, resultará na diminuição do rendimento dos outros dois. De acordo com o Goltsev *et al.* (2016), sob operação normal e eficiente das reações fotossintéticas, a intensidade da fluorescência da clorofila permanece baixa, enquanto qualquer perturbação da fotossíntese que reduza sua eficácia resulta em um aumento significativo na fluorescência.

O Fotossistema II (PSII) é o local de oxidação da água na fotossíntese. A energia luminosa, capturada pelas clorofilas e carotenóides da antena é transferida para o centro de reação do PSII. Uma das características marcantes do PSII é a sua suscetibilidade a danos por luz excessiva, no entanto, as plantas usam estratégias complexas para evitar grandes danos. Entretanto, o estresse supera as estratégias das plantas, os cloroplastos precisam reparar os danos causados.

Ohad *et al.* (1984) relatam que a proteína D1, importante componente no complexo PSII, é danificada e degradada rapidamente no processo de estresse, no entanto, ela é rapidamente substituída por uma proteína recém-sintetizada evitando um processo denominado de fotoinibição. Kruse *et al.* (1991) descrevem que durante a fotoinibição podem ocorrer alterações conformacionais do PSII.

O espectro da fluorescência difere da luz absorvida, com o pico de emissão de fluorescência, ocorrendo em comprimentos de onda maiores do que os da absorção. Deste modo, é possível quantificar a eficiência da fluorescência ao expor uma folha à luz de um comprimento de onda específico e medir a quantidade de luz remeida em comprimentos de onda mais longos. (MAXWELL; JOHSON, 2020).

Nesta abordagem, é disparado um flash de luz de alta intensidade e curta duração. Quando a luz de excitação é ligada, o fotodetector monitora a fluorescência da clorofila na faixa de comprimento de onda de aproximadamente 680 a 760 nm (GOLTSEV, V. N. *et al.*, 2016). Durante o flash, o rendimento e fluorescência atingem um valor equivalente ao que seria alcançado na ausência de qualquer extinção

fotoquímica, a fluorescência máxima (F_m). A comparação deste valor com o valor de rendimento de fluorescência no estado estacionário na luz (F_t) e o rendimento de fluorescência na ausência de luz (F_o).

Outro parâmetro é denominado de rendimento quântico do PSII, dado pela expressão F_v/F_m , é uma medida da eficiência intrínseca (ou máxima) do PSII, uma mudança em F_v/F_m é devido a uma mudança na eficiência da extinção não fotoquímica (MAXWELL; JOHSON, 2000). Como indicador sensível do desempenho fotossintético das plantas, com valores ótimos de cerca de 0,83 medidos na maioria das espécies de plantas (GOLTSEV *et al.*, 2016). Valores inferiores a este são observados quando a planta sofre o fenômeno da fotoinibição, ou seja, exposição ao estresse.

2.5 Inteligência Artificial na Agricultura

A inteligência artificial (IA) é uma denominação comumente utilizada para se referir ao campo da ciência destinado a fornecer máquinas com a capacidade de realizar funções como lógica, raciocínio, planejamento, aprendizagem e percepção. (SANTOS, 2021). Sendo assim, pode ser pensada como uma simulação da capacidade de pensamento abstrato, criativo e dedutivo, e particularmente da capacidade de aprender, características as quais se relacionam com a inteligência no comportamento do homem, no entanto, usando a lógica digital e binária dos computadores (MARR, 2019). Com as constantes mudanças no ambiente agrícola, tem havido uma crescente demanda por soluções equilibradas e contínuas. Isso ocorre em meio à redução na disponibilidade de mão de obra, alta demanda por recursos naturais, alta idade média dos agricultores e baixa renovação da população agrícola (DA COSTA BORBA *et al.*, 2022). Neste sentido, o uso da IA na agricultura tem se tornado uma alternativa para superar os desafios, visando a modernização da atividade agrícola. Patrício e Rieder (2018) analisam a possibilidade da IA na produção de grãos e para a detecção de doenças, qualidade de grãos e fenotipagem. Na ciência da floresta, a IA se faz muito presente, utilizada na dinâmica populacional, padronização de crescimento e até mesmo na previsão de eventos como os incêndios florestais (GOUVÊA *et al.*, 2023).

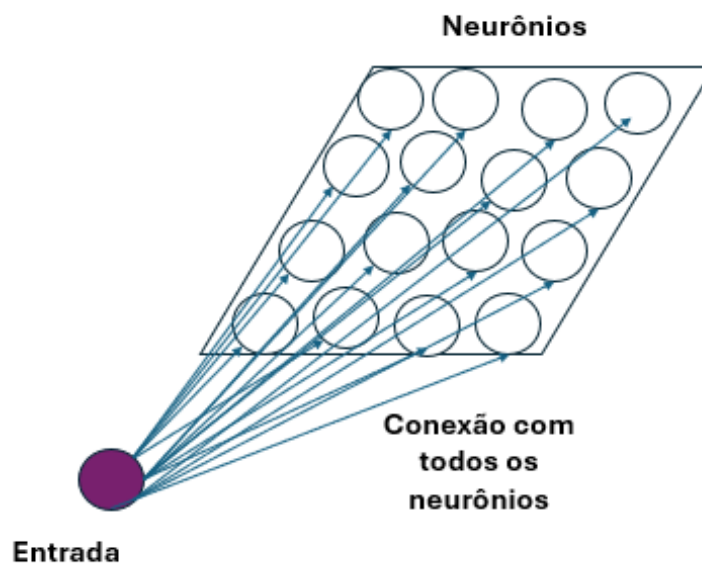
2.5.1 Redes Neurais Artificiais e as redes auto-organizáveis de Kohonen (SOM)

As Redes Neurais Artificiais ou Artificial Neural Networks (ANNs) são modelos computacionais inspirados no sistema nervoso dos seres vivos. De acordo com Silva; Spatti; Flauzino (2010), as ANNs possuem a capacidade de aquisição e manutenção de conhecimentos (baseado em informações) e podem ser definidas como um conjunto de unidades de processamento caracterizada por neurônios artificiais, que são interligados.

Existem redes de diversas categorias, que estruturalmente, além das conexões, podem conter: camada de entrada, encarregada de receber os dados no sistema; camada(s) oculta(s), compostas pelos neurônios encarregados de extrair as características associadas ao problema proposto, e nas quais ocorre a maior parte do processamento interno da rede; e camada de saída, encarregada pela produção e a apresentação dos resultados da rede.

Com respeito ao aprendizado, as ANN podem ser categorizadas em supervisionado ou não-supervisionado. O primeiro tipo necessita de um conjunto de padrões de entradas e saídas que possam ser devidamente treinadas. Nesses casos, os ajustes dos parâmetros da rede são realizados a partir das apresentações sucessivas desses padrões entrada-saída à rede, o que configura o chamado aprendizado supervisionado (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2016). O segundo tipo necessita apenas do padrão de entrada. Em certas aplicações, somente um conjunto de padrões de entrada está disponível, não existindo as respectivas saídas. Todavia, essas amostras possuem informações relevantes sobre o comportamento do sistema do qual foram extraídas. Esses sistemas podem ser avaliados por redes neurais que apresentam o chamado aprendizado não supervisionado, que atua sobre os dados de entrada buscando padrões existentes no conjunto de dados. É neste contexto que se categoriza as redes auto-organizáveis de Kohonen ou Self Organizing Map (SOM), as quais podem ser utilizadas para estudo e avaliação da diversidade genética em populações de melhoramento.

Figura 1 - Arquitetura de uma rede SOM Bidimensional



Fonte: Esquema de rede SOM, elaborado pela autora (2024).

A identificação destes *clusters* é importante para o entendimento das relações dos seus elementos constituintes, permitindo ainda identificar as funções de um componente ou amostra com base nos atributos dos outros elementos que fazem parte do grupo (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2016).

As redes SOM são estruturadas em três fases: competitiva, cooperativa e adaptativa. De acordo com Silva (2004), os neurônios da camada de saída competem entre si, considerando um critério, geralmente a distância Euclidiana, para encontrar um único vencedor (*j*). Chamado também de Best Match Unit (BMU), na fase posterior, também chamada de cooperativa, onde se definem os vizinhos deste neurônio e, por fim, na fase adaptativa é feito o ajuste dos vetores do neurônio vencedor e de seus vizinhos (SADECK, 2015). Haykin (2008) afirma que o principal objetivo do mapa auto-organizável é transformar um padrão de sinal incidente de dimensão arbitrária em um mapa discreto uni ou bidimensional e realizar esta transformação adaptativamente de uma maneira topologicamente ordenada.

Sadeck (2015) destaca que, após o treinamento, é realizado o agrupamento de padrões em *clusters*, no primeiro momento tem-se o mapeamento mais grosseiro e, posteriormente, um refinamento. Nesse sentido, a rede descobre quantos *clusters* ela deve identificar e as suas posições relativas no mapa.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Características da área

O experimento foi realizado no período de junho de 2022 a novembro de 2023, na casa de vegetação na área experimental da UNESP - Câmpus de Dracena, nas coordenadas: Latitude 51°32' e Longitude 21°29', altitude de 396 m. De acordo com a classificação de Köppen, o clima predominante na região é do tipo Aw, e dados climáticos médios anuais: temperatura média 24°C, umidade relativa 64% e precipitação pluvial de 126 mm/ano. A terra utilizada foi oriunda de um solo classificado como Argissolo Vermelho distrófico com textura arenosa.

3.2. Recipientes

Os recipientes utilizados foram compostáveis, denominados de Berço Germinador Compostável ou SIS (sistema inteligente sustentável) BGC® (imagem 1a), elaborado e produzido pela empresa Correia Neto. Esses recipientes se assemelham estruturalmente ao tubete convencional, no entanto, apresentam conformação ligeiramente diferente e possuem orifícios em sua lateral. Eles foram elaborados para serem mais leves e de espessura mais fina do que o tubete de polipropileno, outra característica importante se dá ao fato de possibilitar o plantio juntamente a muda.

Foi utilizado ainda o recipiente comum, sendo esse, o mais utilizado para a produção de mudas em viveiros. Diferente do Berço Germinador Compostável (Foto 1A), o tubete comum é construído de polipropileno (Foto 1B), possui rigidez e espessura superior ao recipiente biocompostável. Na utilização do tubete convencional é necessário retirar do recipiente no momento do plantio.

3.3 Mudas

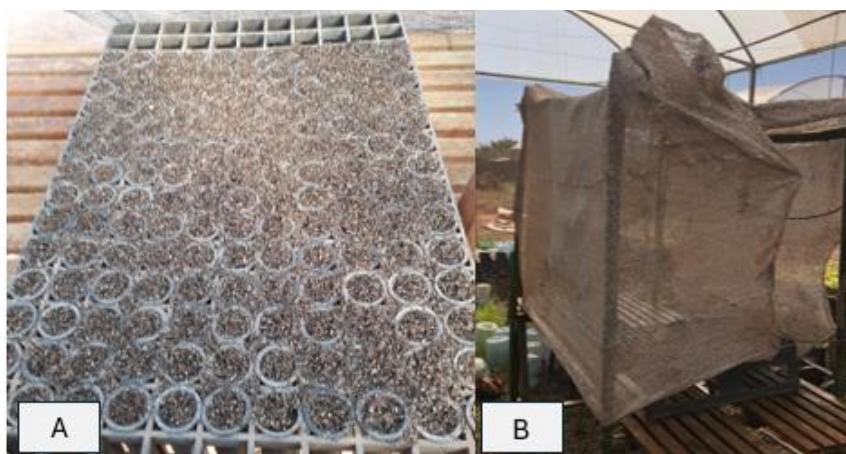
Sementes de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urograndis* foram semeadas em substrato Carolina Soil®, tanto em tubetes de polipropileno convencional, como ilustrado na Foto 2A, quanto em SIS BGC®. O cultivo inicial ocorreu sob abrigo de sombrite, visando criar um microclima propício durante a fase inicial de germinação e crescimento das mudas dentro da casa de vegetação, conforme demonstrado na Foto 2B. A casa de vegetação estava equipada com sistema de irrigação, irrigando 4 vezes ao dia.

Foto 1 - Diferentes recipientes de produção: (A) recipiente biocompostável SIS BGC®, (B) recipiente convencional



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Foto 2 - Bandeja com recipiente convencional (A), estrutura elaborada para promover microclima no desenvolvimento inicial das plântulas (B)



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Os desbastes das plantas foram realizados quando as mudas estavam com cerca de 5 cm de altura, selecionou-se a planta mais vigorosa por recipiente, como representado na Foto 3A. Aos 60 DAS, retirou-se o sombrite e as plantas foram descentralizadas na bandeja, conforme a Foto 3B com o objetivo de diminuir a

competição por incidência solar, evitar o microclima favorável para o desenvolvimento de pragas e doenças e estimular o desenvolvimento das plantas.

Foto 3 - Plantas após o desbaste (A), mudas descentralizadas (B)



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Aos 150 DAS, as plantas foram transplantadas para vasos de 3,6 L (Foto 4). Posteriormente, houve diminuição na frequência de irrigação, visando iniciar o processo de rustificação das plantas.

Foto 4 - Plantas retiradas dos recipientes convencionais no momento do plantio (A).
Transplântio das mudas para vasos de 3,8 L (B)



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

3.4 Delineamento Experimental

O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 8x2, com 6 repetições. Foram considerados o fator tratamento foliar, com 8 níveis, sendo estes descritos na Tabela 1. Ainda, foi considerado o tipo de recipiente, com dois níveis: Tubete convencional e o Tubete compostável.

Foram considerados dois experimentos, com duas espécies: *Eucalyptus urograndis* (94 plantas) e *Corymbia citriodora* (91 plantas).

Tabela 1 - Relação dos tratamentos

Tratamento	Composição
T1	Testemunha
T2	Fósforo
T3	Bioestimulante 1
T4	Bioestimulante 2
T5	Silício
T6	Fósforo + Bioestimulante 1
T7	Fósforo + Bioestimulante 2
T8	Fósforo + Silício

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os bioestimulantes possuíam as seguintes composições: bioestimulante 1 - Nitrogênio (N) solúvel em água – 4,7% Zinco (Zn) solúvel em água – 0,75% Carbono Orgânico Total (COT) – 4,70%. Bioestimulante 2 - Cobalto solúvel em água (Co) 0,50%; Cobre solúvel em água (Cu) 0,64%; Ferro solúvel em água (Fe) 0,80%; Manganês solúvel em água (Mn) 4,00%; Molibdênio solúvel em água (Mo) 4,00%; Zinco solúvel em água (Zn) 2,00%. A aplicação dos nutrientes se deu via foliar. Foram realizadas com o pulverizador, respeitando as doses de acordo com a recomendação da bula dos fabricantes. Foi mensurada a altura da parte aérea (H), obtida por meio da fita métrica antes do início da aplicação dos nutrientes. Após, foi mensurado o teor de fluorescência de uma folha por planta, sendo essa a mais recente totalmente expandida, com fluorômetro de excitação contínua portátil OSI 30P da OPTI-SCIENCE®, no início da manhã. Foram calculadas as variáveis de eficiência quântica efetiva do FSII ($F_v/F_m' = F_s/F_m'$) (Foto 5).

3.4. Tratos Culturais

Durante a condução do experimento, foram realizados os seguintes tratos culturais. Na fase inicial do ciclo da cultura, foi primordial o controle das formigas

cortadeiras (*Atta spp.* e *Acromyrmex spp.*), com o emprego de Reagente®, na casa de vegetação (Foto 6). Foram observadas injúrias em algumas folhas, característico de ataque de lagartas, o controle foi por meio de catação das lagartas e a aplicação de inseticida.

Foto 5 - Mensuração da altura das plantas e fluorescência



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Foto 6 - Plântulas sob ataque de formigas cortadeiras



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Foto 7 - Controle da lagarta-das-folhas (*Spodoptera eridania*)



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

3.5 Análise dos Dados

Toda a análise estatística foi realizada por meio de rotinas desenvolvidas pelos autores no software R (R Core Team, 2024).

3.5.1 ANOVA

Foi realizada análise de variância considerando o delineamento experimental descrito anteriormente. Adicionalmente, para análise genética, foram considerados os resíduos da ANOVA, os quais contêm um efeito de genótipo acrescido de um efeito ambiental.

3.5.2 Análise de diversidade por meio de método tradicional

Foi realizada a análise de diversidade genética por meio de método tradicional de cálculo da distância genética e construção de dendrograma. Para tanto, foram considerados os resíduos da ANOVA das características avaliadas: H e Fv/Fm.

Utilizou-se o cálculo da distância genética por meio da distância Euclidiana média, dada por: $d_{ii'} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_j (x_{ij} - x_{i'j})^2}$; em que x corresponde ao valor genético das $j = 1, 2$ características tomadas como variáveis, avaliadas nos $i = i' = 1, 2, 3, \dots, N$

indivíduos, para toda combinação de indivíduos dois a dois nas quais $i \neq i'$; para cada população.

Ainda, foi considerado o método hierárquico do UPGMA para construção do dendrograma baseado nas distâncias genéticas com o intuito de avaliar e evidenciar a diversidade genética dentro das respectivas populações.

3.5.3 Análise de diversidade pelo método SOM

Foi realizada a análise de diversidade genética e agrupamento dos 185 indivíduos por meio do método SOM de aprendizagem computacional não supervisionada (Kohonen, 1990). Para análise, foram considerados os resíduos da ANOVA, os quais devem estar “limpos” dos efeitos dos níveis dos fatores dos tratamentos considerados.

Para arquitetura da rede, foi considerado inicialmente um mapa quadrado com topologia hexagonal, com $M \approx 5\sqrt{N}$ neurônios; sendo M o número de neurônios e N , o número de indivíduos avaliados; segundo proposto por Tian et al. (2014). Dessa forma, foi montado um mapa com $M \approx 5\sqrt{90} \approx 49$ neurônios (7×7) no total. Uma avaliação preliminar do mapa permitiu a identificação de diversos neurônios vazios. Foram testadas então topologias de tamanho menor e adotada a rede de dimensão $(6 \times 6) = 36$ neurônios, visando acomodar observações de cada população.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANOVA

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados da análise de variância para as características avaliadas, considerando a altura de planta (H) e Fv/Fm.

Tabela 2 - Análise descritiva das características avaliadas, considerando os fatores tratamento foliar e tipo de recipiente, na espécie *C. citriodora*

FV	GL	QM	
		H	Fv/Fm
Trat. Foliar	7	88.4184	0.0078*
Recipiente	1	3336.9244***	0.0016
Interação	7	218.9333	0.0053
Resíduo	75	125.2706	0.0031
$\bar{x}$		55.2527	0.7048
CV (%)		20.26	7.93

* – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$.

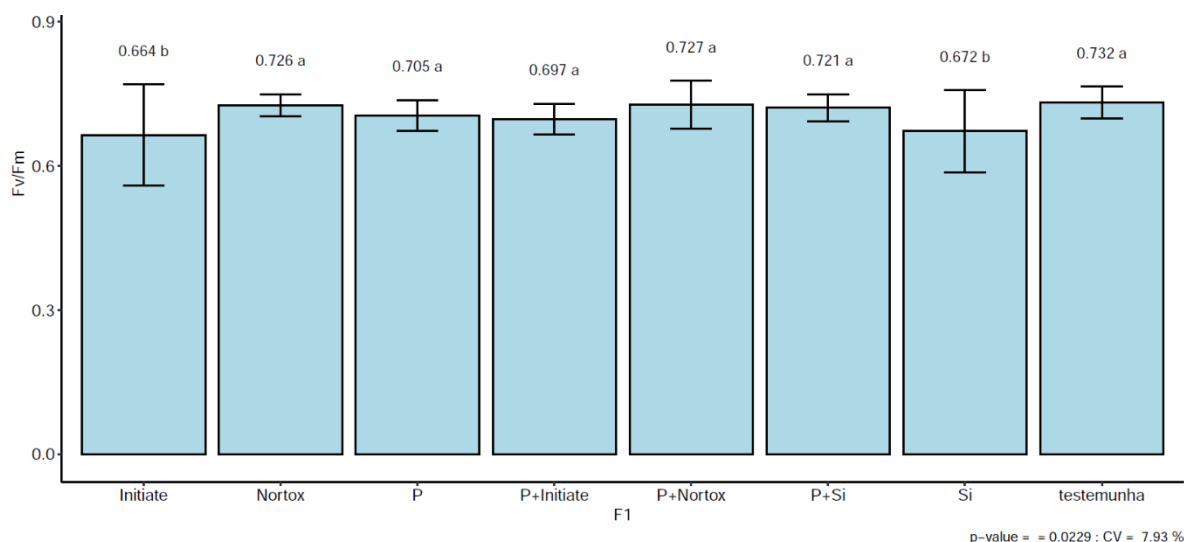
FV: fonte de variação; GL: Grau de Liberdade; H: altura de planta; Fv/Fm: eficiência quântica potencial do PSII.

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os resultados apresentaram significância para o fator de tratamento foliar, para as características *Fv/Fm* na espécie *C. citriodora*. De acordo com Giardi *et al.* (2001), a técnica da fluorescência de clorofila baseia-se em informação biológica sobre efeitos de toxicidade de contaminantes por meio da inibição na atividade do transporte de elétrons e evolução fotossintética. A técnica é capaz de identificar alterações no PSII sob diversas condições de estresse, devido a sua sensibilidade a uma ampla gama de contaminantes. A interação entre a planta e os nutrientes fornecidos requer estudos adicionais para compreender melhor os resultados obtidos.

Os testes de médias para essas características estão apresentados (Figura 2). Em relação ao efeito do tratamento de aplicação foliar, verificou-se que os valores foram superiores em: Testemunha, P + Nortox; Nortox, P + Si; P e P + Initiate, conduziram a formação de plantas de maior altura ($p > 0,05$).

Figura 2 - Resultado do teste de Skott-Knott para agrupamento de médias de *Fv/Fm* avaliadas para os níveis do fator tratamento foliar da espécie *C. citriodora*

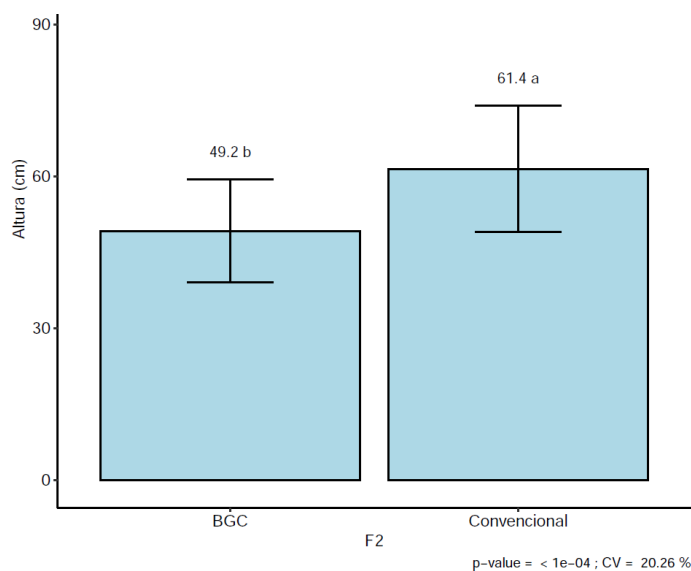


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O P tem efeito positivo no crescimento e na qualidade das mudas de *C. citriodora*. Entretanto, a testemunha também obteve notoriedade. A adubação fosfatada também aumentou o desenvolvimento de mudas de outras espécies florestais, como o *Luehea divacaria* (CECONI *et al.*, 2016), *Parapiptadenia rígida* (SCHUMACHER *et al.*, 2004) e *Psidium guajava* (CÔRREA *et al.*, 2003).

Com relação aos efeitos dos recipientes, observou-se que as plantas cultivadas em recipientes convencionais apresentaram maiores médias em relação as plantas cultivadas em berço germinador compostável (Figura 3).

Figura 3 - Resultado do teste de Skott-Knott para agrupamento de médias de H avaliadas para os níveis do recipiente da espécie *C. citriodora*



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Vallone *et al.* (2010) citam que a forma e o tamanho dos recipientes podem influenciar na dinâmica da movimentação da água no pequeno volume. Durante a condução do experimento, foi observado que as plantas produzidas em recipiente convencional mantiveram a umidade do substrato. Apesar da similaridade na conformação e dimensão com os recipientes convencionais, o Berço Germinador Compostável possui orifícios em sua estrutura para o desenvolvimento radicular das mudas em campo, no entanto, a presença dos orifícios acarretou na perda da umidade do substrato. O estresse hídrico decorrente da perda da umidade do substrato pode limitar o crescimento e a absorção de nutrientes, tornando o desenvolvimento das plantas deficiente.

Para a espécie *E. urograndis*, estão apresentados na Tabela 3 os resultados da análise de variância para as características avaliadas, considerando a altura de planta (*H*).

Tabela 3 - Resumo da ANOVA para as características avaliadas considerando os fatores de tratamento foliar e tipo de recipiente, na espécie *E. urograndis*

FV	GL	QM	
		H	Fv/Fm
Trat. Foliar	7	70.0976	0.0123*
Recipiente	1	5198.4781***	0.0005
Interação	7	314.6075*	0.0067
Resíduo	78	114.3205	0.0046
$\bar{x}$		55.2527	0.7061
CV (%)		20.26	9.62

* – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$.

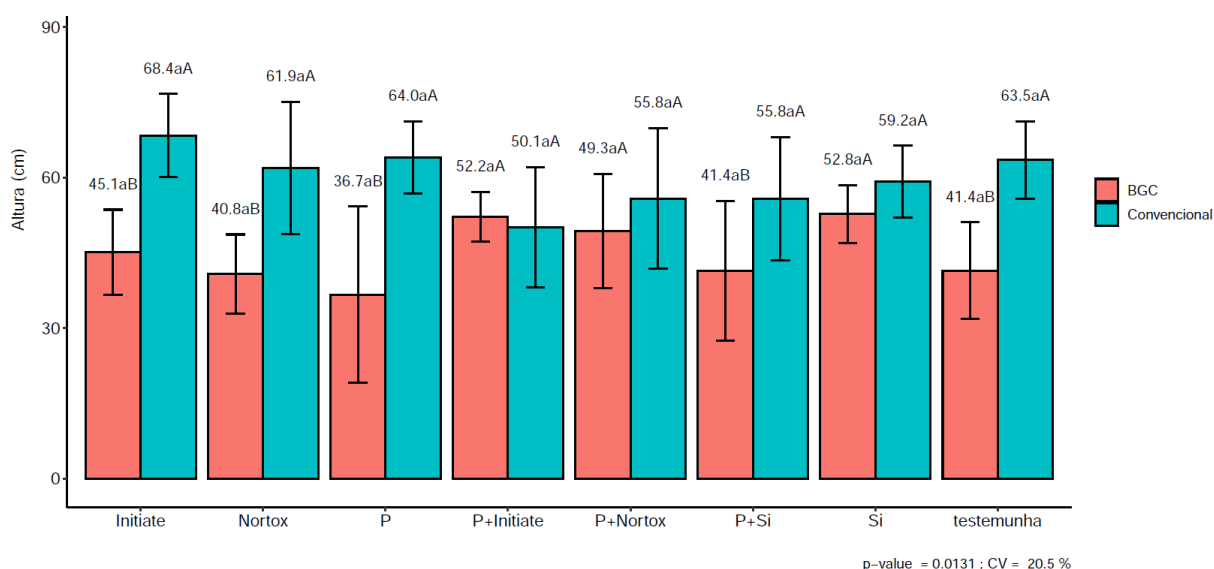
FV: fonte de variação; GL: Grau de Liberdade; H: altura de planta; Fv/Fm: eficiência quântica potencial do FSII.

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O teste de médias para a característica *H* estão apresentados na Figura 4. Referente ao efeito do tratamento de aplicação foliar, verificou-se que os valores foram superiores em: P; P + Initiate; P + Si; Testemunha, conduziram a formação de plantas de maior altura e significativo estatisticamente ($p > 0,05$).

Na figura 4 estão apresentados o resultado do agrupamento de médias para para efeito de interação da característica altura para a espécie *E. urograndis*. O comportamento dos recipientes convencionais apresentou-se o mesmo em todos os níveis de tratamento foliar. Com relação ao comportamento dos recipientes dentro de cada nível de tratamento foliar, observou-se que o Convencional proporcionou melhor desenvolvimento das plantas que o SIS BGC® nos níveis e tratamento foliar: Initiate, Nortox; P; P + Si e Testemunha. Nos demais casos, o convencional e o SIS BGC® não diferiram.

Figura 2 - Resultado do teste de Skott-Knott para agrupamento de médias de H avaliadas para os níveis do fator tratamento foliar, na espécie *E. urograndis*

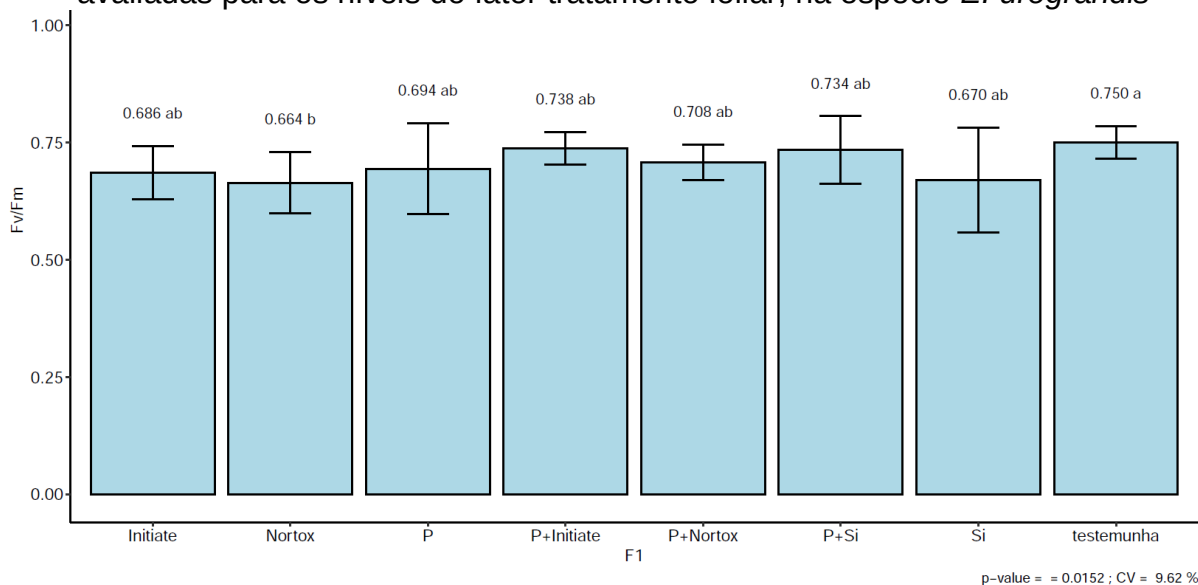


Letra maiúscula compara Recipientes dentro dos níveis de Tratamento foliar. Letra minúscula compara tratamentos dentro dos níveis de recipiente. Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para a espécie *E. urograndis*, os tratamentos com P associados ao Si e ao Initiate, assim como a Testemunha, obtiveram destaque em relação aos demais tratamentos. Os resultados apresentados na figura 5, foram diferentes em relação ao observado para a espécie *C. citriodora*. O porquê do resultado obtido não é claro e mais estudos devem ser realizados para entender as bases fisiológicas e bioquímicas. Fomos capazes de observar que para esta espécie, a aplicação somente do tratamento com P conduz a um maior nível de estresse na planta ($FV/Fm < FV/Fm$ testemunha). O mesmo ocorre para os níveis de tratamento com Si somente, e com Initiate somente. No entanto, a aplicação conjunta do P com estes (P + Initiate, e P + Si)

aparenta apresentar uma resposta sinérgica que conduz a um menor nível de estresse na planta ($FV/Fm \approx FV/Fm_{\text{testemunha}}$).

Figura 3 - Resultado do teste de Skott-Knott para agrupamento de médias de Fv/Fm avaliadas para os níveis do fator tratamento foliar, na espécie *E. urograndis*



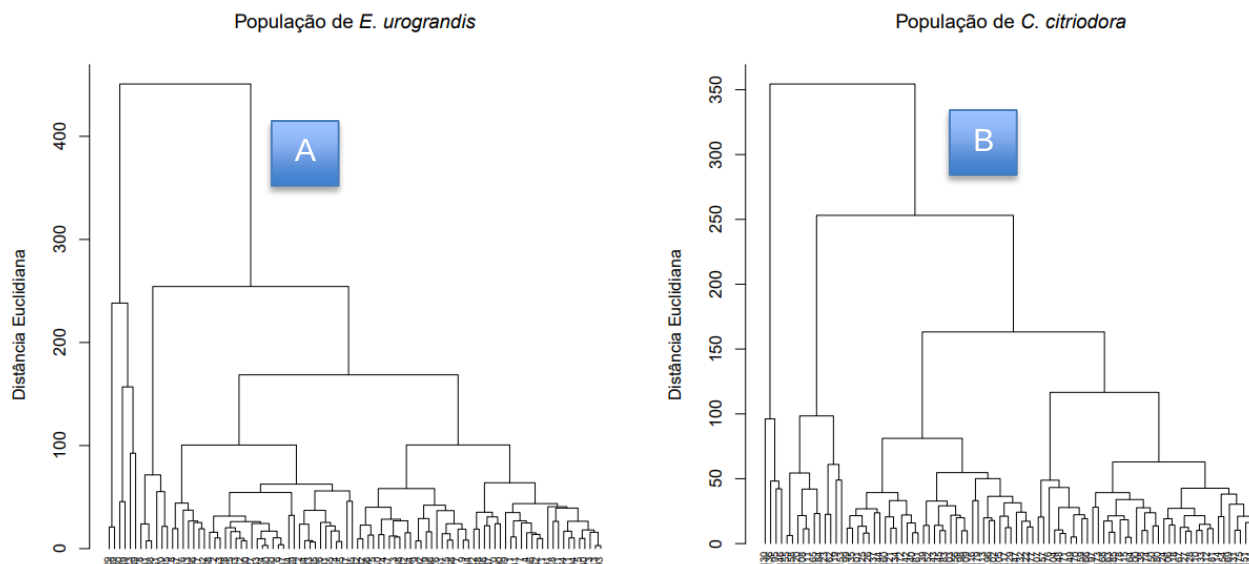
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Como evidenciado para ambas as espécies, os tratamentos com o P em conjunto com diferentes compostos como os bioativadores, que estimulam o crescimento e diferenciação celular, assim como no aumento na absorção de nutrientes, os tratamentos que correlacionam esses compostos demonstraram os melhores desempenhos. Contudo, é necessário mais estudo para entender a interação dos nutrientes com as espécies.

4.2 Análise de Divergência

A diversidade genética remete à variação genética existente no conjunto de indivíduos sob estudo, sendo esta reflexo da vasta quantidade de genes, alelos, e combinações genotípicas encontrados em uma população. Por meio do cálculo distância euclidiana média, foi possível estimar a distância e diversidade genética entre os indivíduos. Na Figura 6 está apresentado o dendrograma para cada população, estudada de forma individual. A população (A) é composta por indivíduos da espécie *E. urograndis* e (B) composta por indivíduos da espécie *C. citriodora*.

Figura 4 - Dendrograma para a população *E. urograndis* e *C. citriodora*.



Fonte: Dados da pesquisa da autora (2024).

A técnica de agrupamento minimiza a variabilidade de dentro do grupo, no entanto, se a estimativa de distância entre pares de indivíduos dentro do grupo é de elevada magnitude, junta-se ao subgrupo (ABREU *et al.*, 2004). A partir da interpretação dos dendrogramas, é possível visualizar dentro das populações de cada espécie a grande diversidade genética, neste sentido, possibilita identificar os indivíduos distintos geneticamente que podem ser utilizados para cruzamentos visando obter efeito heterótico nas populações híbridas.

No entanto, embora os dendrogramas sejam muito empregados em estudos envolvendo populações genéticas, Cruz (2016) relata que os pontos de corte, para estabelecimento de grupos, iniciam-se a partir das mudanças abruptas na ramificação presente no dendrograma, este critério necessita de um conhecimento prévio do pesquisador sobre a similaridade dos indivíduos em seu estudo. O autor destaca que essa separação pode não estar muito clara visualmente, principalmente quando a quantidade de indivíduos a serem agrupados é muito grande. Diante dessa limitação, foi implementado o modelo de aprendizado de máquinas, utilizando a construção de mapas de Kohonen.

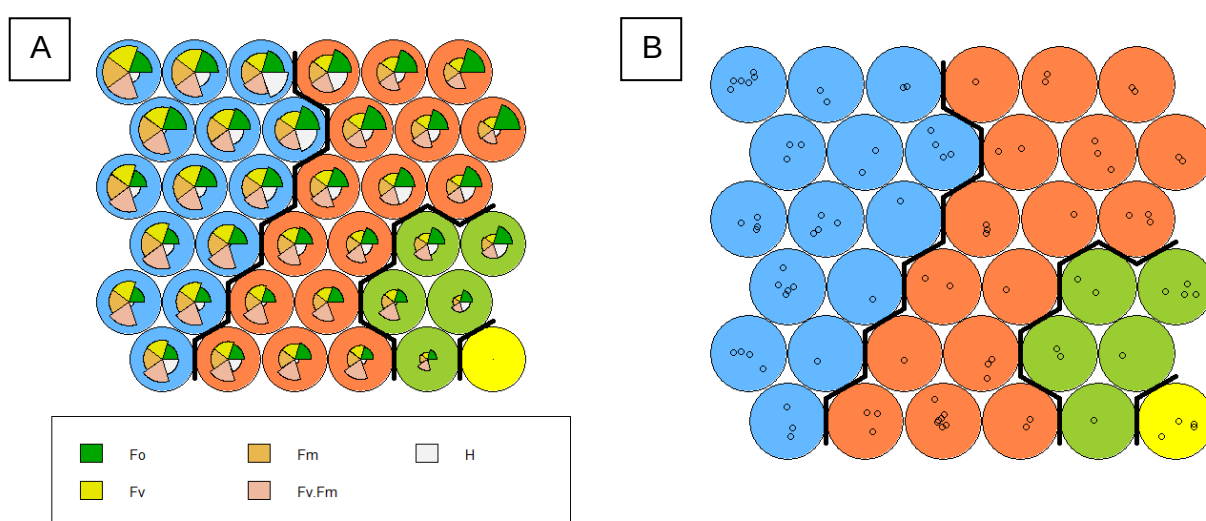
No ajuste do modelo, foi empregado o pacote Kohonen do software R, utilizando uma grade bidimensional de dimensões 6 x 6 neurônios. Os neurônios estão

distribuídos horizontalmente da esquerda para a direita e verticalmente de baixo para cima. Os mapas foram ajustados de modo que haja uma variação gradual nas características das espécies distribuídas em neurônios vizinhos.

Nas Figuras 3 e 4 estão apresentados os mapas auto-organizáveis de Kohonen para as espécies *E. urograndis* e *C. citriodora* respectivamente, com dimensões de 6 x 6 neurônios. Em ambos os mapas, os neurônios estão agrupados de acordo com as características dos indivíduos, e representados por cores diferentes. Nos mapas (A), os diagramas em pizza dentro de cada neurônio informam a respeito do comportamento das características de cada indivíduo. Nos mapas (B), cada neurônio contém a densidade dos indivíduos em seu interior.

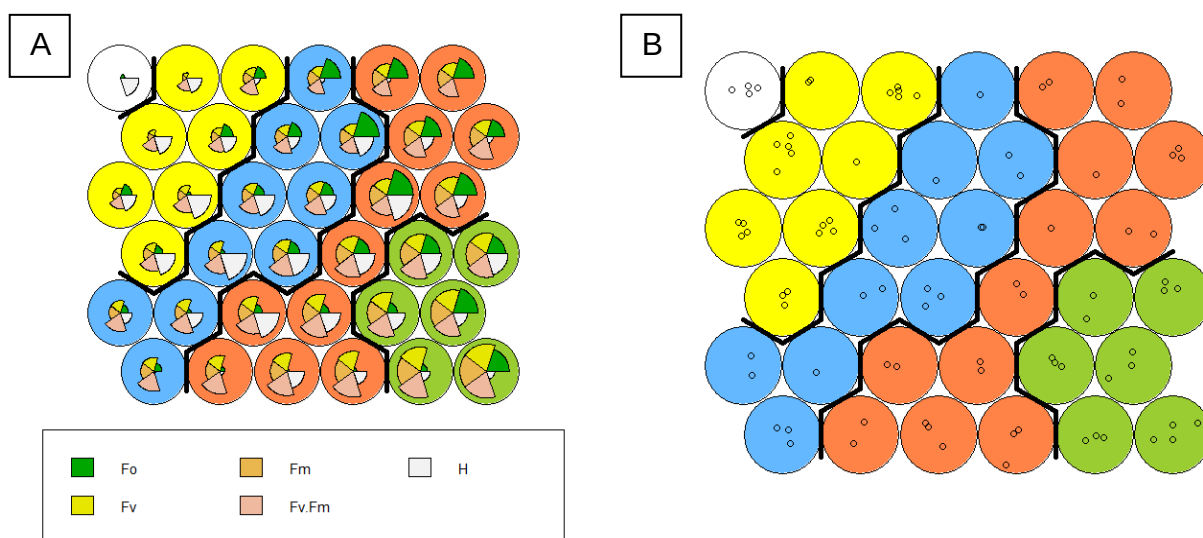
Figura 5 - Mapas auto-organizáveis (SOM) de Kohonen da espécie *E. urograndis* com divisão de 4 subpopulações baseadas no comportamento das características.

(A) Diagrama em pizza evidenciando o comportamento das características no neurônio. (B) Densidade de indivíduos em cada neurônio.



Fonte: dados da pesquisa da autora (2024).

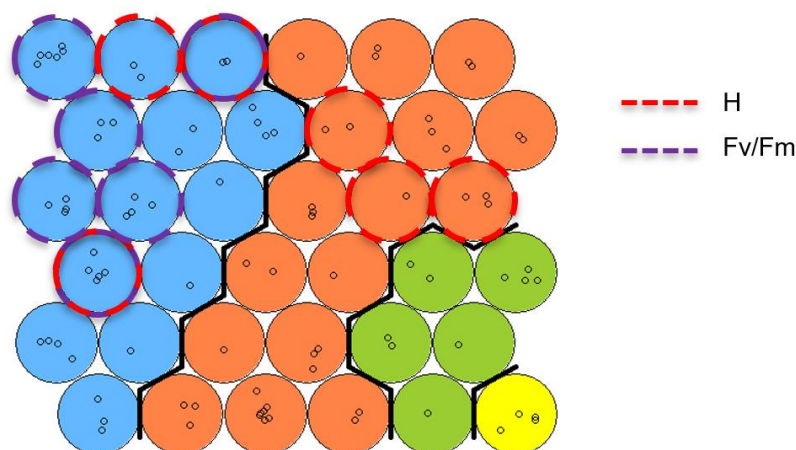
Figura 6 - SOM da espécie *C. citriodora* com divisão de 5 subpopulações baseadas no comportamento das características. (A) Diagrama em pizza evidenciando o comportamento das características no neurônio. (B) Densidade de indivíduos em cada neurônio.



Fonte: Dados da pesquisa da autora (2024).

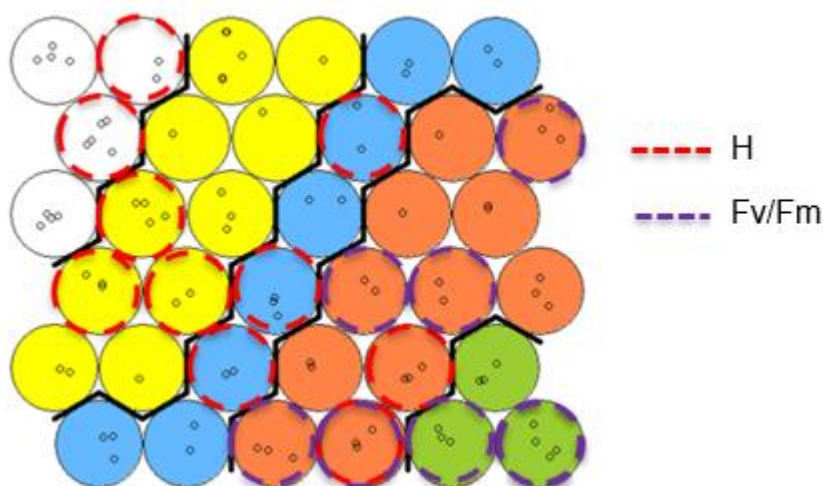
Os mapas apresentados nas Figuras 5 e 6, permitem a visualização da 2variação genética presente nas diferentes espécies de plantas de eucalipto. Devido às características do SOM, esse método é capaz de capturar diferentes padrões nas suas estruturas de dados, classificar os dados com poucas distorções e extrair de forma eficiente as informações (KARASSAWA *et al.*, 2005). Em comparação aos dendrogramas, o SOM reforça a afirmação de que os materiais genéticos exibem uma grande variabilidade comportamental, independente das populações originais dos quais pertencem. Contudo, o emprego da tecnologia facilita a seleção de indivíduos para cruzamento, e a formação de famílias ou populações a partir do seu diagrama gráfico característico. Dessa maneira, o método permite o auxílio na tomada de decisão a respeito da seleção de materiais para cruzamento.

Figura 7 - SOM com identificação dos neurônios que apresentam os melhores indivíduos na população da espécie *E. urograndis*. Os neurônios circulados com diferentes cores correspondem aqueles onde se alocam os 10% melhores indivíduos selecionados para as respectivas características H e Fv/Fm.



Fonte: Dados da pesquisa da autora (2024).

Figura 8 - SOM com identificação dos neurônios que apresentam os melhores indivíduos na população da espécie *C. citriodora*. Os neurônios circulados com diferentes cores correspondem aqueles onde se alocam os 10% melhores indivíduos selecionados para as respectivas características H e Fv/Fm.



Fonte: Dados da pesquisa da autora (2024).

Os genótipos de maior interesse, estão alocados nos neurônios destacados em vermelho, indicando indivíduos mais altos, e em coloração púrpura, representando aqueles com os melhores valores na eficiência quântica potencial. Para recomendar o cruzamento dos indivíduos visando a obtenção de heterose, na população da espécie de *E. urograndis*, os cruzamentos recomendados deveriam priorizar os

aqueles melhores materiais que estão alocados nos grupos de colocação diferentes, respectivamente azul e laranja do mapa. Em relação a população da *C. citriodora*, os melhores materiais estão redistribuídos no mapa de forma difusa, para a característica H; e na parte direita do mapa para Fv/Fm. A recomendação de cruzamentos deveria realizada de forma semelhante ao descrito para a outra espécie.

5 CONCLUSÃO

Concluiu-se que os tratamentos foliares não demonstraram uma resposta clara em relação às duas espécies estudadas. A fim de aprofundar nossa compreensão, é fundamental conduzir mais pesquisas sobre a interação.

As plantas de ambas as espécies produzidas em recipiente biocompostável tiveram o desenvolvimento afetado quando comparado à produção em recipiente convencional. É fundamental conduzir estudos adicionais para compreender e aprimorar os recipientes biocompostáveis.

O método de redes neurais Self Organizing Maps, utilizado como suporte na seleção de genótipos de *Eucalyptus* spp., mostrou-se eficaz na análise da diversidade genética entre as populações estudadas.

Os agrupamentos formados pelos SOMs para os genótipos são considerados importantes devido ao refinamento das análises de redes neurais, comprovando a aplicabilidade das redes neurais SOM em programas de melhoramento genético de plantas.

REFERÊNCIAS

ABREU, F.B. LEAL, N.R.; RODRIGUES, R.; AMARAL JR., A.T; SILVA, D.J.H. Divergência genética entre acessos CC de feijão-de-vagem de crescimento indeterminado. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.22, n.3, p.547–552, 2004.

Agência de Notícias IBGE. (2022). Valor de produção da silvicultura e da extração vegetal cresce 11,9% e atinge recorde de R\$ 33,7 bilhões. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37963-valor-de-producao-da-silvicultura-e-da-extracao-vegetal-cresce-11-9-e-atinge-recorde-de-r-33-7-bilhoes>. Acesso em: 2 maio 2024.

AMARAL JÚNIOR, A.T.; THIÉBAUT, J.T.L. Análise multivariada na avaliação da diversidade em recursos genéticos vegetais. Campos dos Goytacazes - Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, CCTA, 55 p., 1999.

ASSIS, Mayumi Furuya de. Modelos lineares generalizados mistos e aplicações de redes neurais para estudo da diversidade genética em variedades de *Coffea arabica*. 2020.

BORÉM, Aluizio; MIRANDA, Glauco V.; FRITSCHÉ-NETO, Roberto. **Melhoramento de plantas**. Oficina de Textos, 2021.

BOTELHO, Deila M. Santos *et al.* Intensidade da cercosporiose em mudas de cafeeiro em função de fontes e doses de silício. **Fitopatologia Brasileira**, v. 30, p. 582-588, 2005.

BRAGA, A. P.; LUDERMIR, T. B.; CARVALHO, A. P. L. F. Redes neurais artificiais: teoria e aplicações. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 262 p

Cacique, I. S., Domiciano, G. P., Moreira, W. R., Rodrigues, F. Á., Cruz, M. F. A., Serra, N. S., & Català, A. B. (2013). Effect of root and leaf applications of soluble silicon on blast development in rice. *Bragantia*, 72, 304-309

CARVALHO, R.; CURI, N.; NETO, A. E. F.; RESENDE, A. V. Absorção e translocação de silício em mudas de eucalipto cultivadas em latossolo e cambissolo. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 27, n. 3, p. 491-500, 2003.

CECONI, D. E.; POLETTO, I.; BRUN, E. J.; LOVATO, T. Crescimento de mudas de açoita-cavalo (*Luehea divaricata* mart.) sob influência da adubação fosfatada. *Cerne*, Lavras, v. 12, n. 3, p. 292-299, 2006.

CORRÊA, M. C. M.; PRADO, R. M.; NATALE, W.; PEREIRA, L.; BARBOSA, J. C. Resposta de mudas de goiabeira a doses e modos de aplicação de fertilizante fosfatado. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal, v. 25, p. 164-169, 2003.

CRISMEIRE, I.; Influência da densidade do carvão vegetal na produção de silício metálico, Dissertação de mestrado em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa; VIÇOSA, MG 48 p. 2014.

CRUZ, Bruna Cristina Oliveira da. Aplicação de biofertilizante com efeito estimulante no tratamento de sementes na cultura da soja. 2023. 17 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, 2023.

CRUZ, Cosme Damião; FERREIRA, Fábio Medeiros; PESSONI, Luiz Alberto. Biometria aplicada ao estudo da diversidade genética. **Visconde do Rio Branco: Suprema**, v. 620, 2011.

DA COSTA BORBA, Marcelo *et al.* Gestão no meio agrícola com o apoio da Inteligência Artificial: uma análise da digitalização da agricultura. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 15, n. 3, p. 1-22, 2022.

DE AMORIM, Vanessa da Silva Santos *et al.* Os benefícios ambientais do plantio de eucalipto: revisão de literatura. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 10, n. 11, pág. e318101119604-e318101119604, 2021.

DE ARRUDA SILVEIRA, Ronaldo Luiz Vaz; GAVA, José Luiz. Nutrição e Adubação Fosfatada em *Eucalyptus*¹.

DE ASSIS, Teotônio Francisco; ABAD, Júpiter Israel Muro; AGUIAR, Aurélio Mendes. Melhoramento genético do eucalipto. **Informe Agropecuário, Belo Horizonte (Brazil)**, v. 18, p. 32-51, 1996.

DE SÁ, Larissa França; TAMBARUSSI, Evandro Vagner. Melhoramento genético como estratégia de gestão da produtividade florestal. **Revista do Instituto Florestal**, v. 35, n. 1, p. 99-112, 2023.

DIAS, A. C. F. Uso de bioestimulante e bioativador na agricultura: **revisão bibliográfica**. 2021.

DIAS, B. A. S.; MARQUES, G. M.; SILVA, M. L.; COSTA, J. M. F. N. Análise econômica de dois sistemas de produção de mudas de eucalipto. **Revista Floresta e Ambiente**. v. 18, n. 2, p. 171-177, 2001.

DRUMOND, M. A.; DE OLIVEIRA, V. R.; RIBASKI, J. **Eucalipto no Semiárido brasileiro**. 2016.

EPSTEIN, E. Silicon. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, v.50, p.641-664, 1999. INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). 2017. **Relatório Técnico**. São Paulo, 2017.

Eucalyptus dunnii em resposta à aplicação de fósforo. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 16, n. 3, p. 203-213, 2017.

FABRO, A.T.; LINDEMANN, C.; VIEIRA, S.C. Utilização de sacolas plásticas em supermercados. Campinas: **Revista Ciências do Ambiente OnLine**. v. 3, n. 1, UNICAMP, 2007002E

FLORES, Thiago Bevilacqua et al. **Eucalyptus no Brasil: zoneamento climático e guia para identificação**. Piracicaba: IPEF, 2016

FOELKEL, C. E. B. Eucalipto no Brasil, história de pioneirismo. **Revista Visão Agrícola**, v. 3, p 66-69, 2005. Disponível em: <http://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/va04-florestas-plantadas03.pdf>. Acesso em: 2 de maio de 2024.

FREITAS, A. J. P.; KLEIN, J. E. M. Aspectos técnicos e econômicos da mortalidade de mudas no campo. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO (1.:1993: Curitiba); **CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO** (7.: 1993: Curitiba). Anais. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 1993. p. 736.

GIARDI, M.T.; KOBLÍZEK, M. & MASOJÍDEK, J. Photosystem II-based biosensors for the detection of pollutants. *Biosens. Bioelectron.*, 16:1027-1033, 2001

GOMES, J.M.; PAIVA, H.N. Viveiros florestais: propagação sexuada. 3. ed. Viçosa: UFV, 2004, 116p.

GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. Deep Learning, ser. Adaptive computation and machine learning MIT Press Cambridge, Massachusetts; London, 2016.

GOUVÊIA, Marcelo Antônio De Sousa *et al.* INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADA À CIÊNCIA FLORESTAL. **CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO AVANÇOS E TENDÊNCIAS EM PESQUISA-VOLUME 2**, v. 2, n. 1, p. 128-143, 2023.

GRATTAPAGLIA, Dario. Genolyptus-Rede Brasileira de Pesquisa do Genoma de *Eucalyptus*. **Comissão Organizadora**, p. 61, 2001

HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. H.; FRIEDMAN, J. H. The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction. [s.l.]: Springer, 2009. v. 2

HAYKIN, Simão. **Redes Neurais: Princípios e Prática**. [Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2007. *E-book*. ISBN 9788577800865. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788577800865/>. Acesso em: 26 abr. 2024.

IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores. Relatório anual. 2023. 80 p. Disponível em: Acessado em: 14 abril. 2024.

IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores. Relatório anual. 2023. 80 p. Disponível em: Acessado em: 23 de abril. 2024.

Instituto Nacional de Estatística. (2021). **Balanço Energético Nacional** [Relatório]. Disponível em: <https://www.institutonacionaldeestatistica.gov.br/balanco-energetico>. Acesso em: 4 maio 2024.

KARASAWA, Mina *et al.* Aplicação de métodos de agrupamento na quantificação da divergência genética entre acessos de tomateiro. **Horticultura Brasileira**, v. 23, p. 1000-1005, 2005.

Kate Maxwell, Giles N. Johnson, Fluorescência da clorofila - um guia prático, **Journal of Experimental Botany**, Volume 51, Edição 345, abril de 2000, páginas 659–668.

KOHONEN, T. **The self organizing map. Proceedings of the IEEE**, vol. 78, no. 9, pp. 1464-1480, 1990.

KRAUSE, um GH; WEIS, E1. Fluorescência da clorofila e fotossíntese: o básico. **Revisão anual de biologia vegetal**, v. 42, n. 1, pág. 313-349, 1991.

LIMA FILHO, O. F.; LIMA, M. T. G; TSAI, M. Silício pode aumentar a resistência de plantas a doenças. **Boletim informativo do Grupo de Estudos “Luiz de Queiroz”**, n. 87, p. 8-12, 1999. (Encarte técnico).

LINHARES JÚNIOR, José Antônio. Estudo da fibra de coco para confecção de recipientes biodegradáveis. 2016.

MAEDA, Shizuo; BOGNOLA, Itamar Antonio. Influência de calagem e adubação fosfatada no crescimento inicial de eucalipto e nos níveis críticos de P. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 72, p. 401-401, 2012.

MARR, Bernard. Artificial Intelligence Has a Problem with Bias, Here's How to Tackle It. **Forbes**, Abril, 2024. Disponível em <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2019/01/29/3-st4eps-totackle-the-problem-of-bias-in-artificial-intelligence/#3ca8ca597a12/> . Acesso em: 22 abr. 2024.

MARTINI, Augusto Jeronimo. **O plantador de eucaliptos: a questão da preservação florestal no Brasil e o resgate documental do legado de Edmundo Navarro de Andrade**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MATTOS, Airton Pozo de *et al.* A Trajetória de aprendizagem no ensino superior: percepções de acadêmicos. 2005.

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

MENDES, Carlos Augusto Corrêa; EL-ROBRINI, Muamar; DE MORAES, Hito Braga. Dinâmica dos fundos das áreas de disposição de sedimentos dragados na Baía de Guajará, Pará, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 1, p. 1078, 2022.

MINGORANCI, Vitória Costa. Uso de redes neurais artificiais para avaliação comparativa do desenvolvimento de mudas de *Eucalyptus* spp. produzidas em tubetes de polipropileno e em berço germinador compostável a campo. 2023.

Objetivos de Desenvolvimento Sustentável | **As Nações Unidas no Brasil**. [s.d.]. Disponível em: Acesso em: 15 abr. 2024.

OHAD, I.; KYLE, DJ; ARNTZEN, CJ Danos e reparo de proteínas de membrana: remoção e substituição de polipeptídeos inativados de 32 quilodaltons em membranas de cloroplasto. **The Journal of Cell Biology**, v. 2, pág. 481-485, 1984.

Pinto, S. I. D. C., Ramos, S. J., Araujo, J. L., Faquin, V., Novais, C. B., Silva, K. D., & Furtini Neto, A. E. (2009). Silício como amenizador da fitotoxicidade de zinco em plantas jovens de *Eucalyptus urophylla* cultivadas em solução nutritiva. **Revista Árvore**, 33, 1005-1014.

R Core Team. (2024). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.

RESENDE, R. T., Borém, A., & Leite, H. G. (2022). **Eucalipto, do plantio à colheita**. Editora Oficina de Textos.

RODRIGUES, F. A.; OLIVEIRA, L. A.; KORNDÖRFER, A. P.; KORNDÖRFER, G. H. Silício: Um elemento benéfico e importante para as plantas. **Informações Agrônomicas**, n.134, 2011.

SADECK, Luis Waldyr Rodrigues *et al.* **O zoneamento ambiental por redes neurais artificiais (som) como instrumento de ordenamento territorial na região nordeste do estado do Pará**. 2015.

SANGSTER, A. G. *et al.* Silicon in Agriculture. Studies in plant science. Amsterdam: Elsevier, v. 8, 2001. SILVA, J. C. **A madeira do futuro. Revista da madeira, edição especial** –Eucalipto a madeira do futuro, Curitiba, p. 04, 2001.

SANTOS, Fabio Augusto Guidotti dos; YOSHIZUMI, Victor Hideki. **Evolução da arquitetura de perceptron multicamadas baseadas em otimização por enxame de partículas e colônia artificial de abelhas**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SANTOS, Marcelo Henrique dos. Introdução à inteligência artificial. [Digite o Local da Editora]: Editora Saraiva, 2021. E-book. ISBN 9786559031245. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786559031245/>. Acesso em: 25 abr. 2024.

SCHUMACHER, M. V.; CECONI, D. E.; SANTANA, C. A. Influência de diferentes doses de fósforo no crescimento de mudas de angico-vermelho (*Parapiptadenia rigida* (Benth) Brenan). Revista Árvore, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 149-155, jan./ fev. 2004.

SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas**. São Paulo: Artliber, p. 33-111, 2010.

SILVA, M. A. S. Mapas auto-organizáveis na análise exploratória de dados geoespaciais multivariados. 2004. 117 f. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada), **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, São José dos Campos-SP, 2004.

STAHL, James *et al.* Produção de massa seca e eficiência nutricional de clones de *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus benthamii* em função da adição de doses de fósforo ao solo. **Ciência Florestal**, v. 23, p. 287-295, 2013.

TIAN, J., AZARIAN, M. H., PECHT, M. **Anomaly detection using self-organizing maps-based K-nearest neighbour Algorithm**. Proceedings of the European Conference of the Prognostics and Health Management Society, 2014.

VENTURINI, N.; CAMPINHOS JÚNIOR, E.; MACEDO, G. L. R.; VENTURIM, P. R. Histórico. In: VALE, B. A.; MACHADO, C. C.; PIRES, M. M. J.; VILAR, B. M.; COSTA,

B. C.; NACIF, P. A. Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência. **Viçosa, SIF**, 2014, p. 19-37

VOX, G.; SCHETTINI, E. Evaluation of the radiometric properties of starch-based biodegradable films for crop protection. **Polymer Testing**, n.26, p.639–651, 2007

WENDLING, Ivar *et al.* **Produção de mudas de eucalipto**. In: OLIVEIRA, EB de; PINTO JUNIOR, JE (Ed.). O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento. Brasília, DF: **Embrapa**, 2021. cap. 22., 2021.