



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

VINICIUS EVANGELISTA SILVA

**ATRIBUTOS DO SOLO E DESENVOLVIMENTO RADICULAR EM PLANTAÇÕES
DE EUCALIPTO NO BRASIL**

Ilha Solteira
2019

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
(SISTEMAS DE PRODUÇÃO)

VINICIUS EVANGELISTA SILVA

**ATRIBUTOS DO SOLO E DESENVOLVIMENTO RADICULAR EM PLANTAGENS
DE EUCALIPTO NO BRASIL**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Agronomia. Especialidade: Sistemas de Produção.

Orientador: Salatiér Buzetti

Coorientador: Jean-Paul Laclau

Ilha Solteira
2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Silva, Vinicius Evangelista.
S586a Atributos do solo e desenvolvimento radicular em plantações de eucalipto no Brasil / Vinicius Evangelista Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
115 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, 2019

Orientador: Salatiér Buzetti
Co-orientador: Jean-Paul Laclau
Inclui bibliografia

1. Atributos químicos e físicos do solo. 2. Raízes das camadas profundas do solo. 3. *Eucalyptus* sp. 4. Plantações florestais.



João Josué Barbosa

Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Diretor Técnico
CRB 8-5642



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título:

AUTOR: VINÍCIUS EVANGELISTA SILVA
ORIENTADOR: SALATIER BUZETTI
COORIENTADOR: JEAN-PAUL LACLAU

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA,
especialidade: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. SALATIER BUZETTI
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. MARIO LUIZ TEIXEIRA DE MORAES
Departamento de Fitotecnia, Tecnologia de Alimentos e Sócio Economia / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Dr. CLAYTON ALCARDE ALVARES
Departamento de Tecnologia Florestal / Suzano Papel e Celulosa

Prof. Dr. OTÁVIO CAMARGO CAMPOE
Departamento de Engenharia Florestal / Universidade Federal de Lavras

DEDICATÓRIA

À Deus.

Aos silvicultores e cientistas do Brasil.

Aos meus pais Maria Helena e Francisco Teixeira (em memória), aos meus filhos Marco Antônio e Theo, minha querida amada Cynara, e meus irmãos Wagner, Renata e Sabrina.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Estadual Paulista (UNESP) e ao estado de São Paulo que me possibilitaram ter esta experiência radicalmente transformadora.

Ao professor e orientador Salatiér Buzetti, pela aceitação na orientação, ensinamentos de vida, profissionais, espirituais e científicos.

Ao meu co-orientador Jean-Paul Laclau pelos ensinamentos de engenharia florestal, e por me mostrar a importância de fazer “ciência para a sociedade”.

Aos professores da Pós-graduação em Sistemas de Produção da UNESP, em especial, Fernando Tadeu, Fernando Tangerino, Thiago Nogueira, Alan Panosso, Katia Maltoni (minha querida anfitriã durante a pós) pela hospitalidade na UNESP e vários ensinamentos.

Em especial, fica o meu eterno agradecimento aos professores Rafael Montanari e Marcelinho Minhoto por ter me “infiltrado” na UNESP de Ilha Solteira.

Ao programa cooperativo TECHS que foi o grande laboratório de idéias e de recursos para que fosse possível a realização desta tese. Em especial, Stape, Otávio, Clayton, Rafaela por todo apoio técnico e pelas diversas contribuições durante a concepção e elaboração da tese. Agradeço também a todas instituições de pesquisas que participei a longo desta jornada: Programa Cooperativo em Silvicultura e Manejo (PTSM – ESALq / USP), NUTREE (UFV), Forest Productivity Cooperative (FPC), e que através da integração entre empresas e universidades garantem um “sopro” de esperança que a ciência seja feita para a sociedade, e que esta perceba o retorno investido nas universidades.

A Eldorado Brasil Celulose S.A pelo apoio na concessão de recursos financeiros e por possibilitar a minha formação profissional e no doutorado. Em especial, ao Sr. Germano Vieira quem foi um dos incentivadores da realização da minha pós-graduação, o meu muito obrigado.

Um agradecimento especial ao João Flávio e Sharlles Dias que foram também dois grandes incentivadores e entusiastas desta tese e verdadeiros “companheiros florestais” para todas as discussões científicas e técnicas. Ao João Flávio meus profundos e sinceros agradecimentos por todo o exemplo e testemunho de sinceridade, sabedoria e valorização das pessoas.

Aos meus queridos amigos da Eldorado: Leonardo Rosse, Luciano Ramos, João Leonardo, Fernando e Jenifer pelo apoio ao longo do curso de pós-graduação.

Aos colegas de Ilha Solteira, Paulão, Sara, Edmar, Jailton, Karla Sena por todo o companheirismo, trocas de experiências e longas rodadas de estudos (pareciam que não teriam fim...) que enriqueceram e muito o nosso repertório e rol acadêmico.

Aos meus grandes amigos da graduação João Paulo, Felipe, Nemer, Moacir, Otávio, André e Mauro pelo grande aprendizado durante o curso de engenharia florestal, companheirismo, e os bons momentos durante o convívio tão saudável.

Aos amigos de Curvelo (MG), Otávio, Mauro, Daniel, Bruno, Raimundo, Isaac pela força e amizade.

Aos funcionários da UNESP Márcia, Thais, João da Biblioteca, pelo profissionalismo e cordialidade.

Enfim, a todos que participaram para o meu crescimento pessoal e profissional, eu agradeço.

Muito obrigado!

“A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido e não na vitória propriamente dita”

Mahatma Gandhi

RESUMO

O desenvolvimento radicular em plantações de eucalipto tem sido apontado como uma das estratégias cruciais para sua adaptação e crescimento, em especial, em condições tropicais, que possuem solos pobres em nutrientes. Neste contexto, torna-se extremamente importante avaliar o perfil do solo nestas plantações, a luz de uma perspectiva de fornecimento de nutrientes e água para as plantações de eucalipto. Tendo isto em vista, especificamente nesta tese, dois trabalhos foram conduzidos para avaliar os atributos do solo e o desenvolvimento radicular em plantações de eucalipto no Brasil, a saber: 1) Disponibilidade de Água no Solo em Plantios de Eucalipto em uma Cronosequência, e suas Relações com a Produtividade e Densidade Básica da Madeira e suas Estimativas Através de Redes Neurais Artificiais no Brasil; 2) Padrões e Distribuição Vertical dos Atributos do Solo na Plantação de Eucalipto no Brasil. A rede experimental completa possui 34 experimentos plantados em um gradiente climático no Brasil e 2 locais no Uruguai, com 36 locais experimentais no total. Avaliaram-se sítios desde baixo incremento médio anual ($13,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, 61% abaixo da média nacional de produtividade), até sítios com elevada produtividade com IMA de $67,2 \text{ m}^3 \text{ há}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (92% acima da média nacional de produção de madeira). No trabalho 1, avaliaram-se 14 experimentos, e no trabalho 2, 4 experimentos, todos eles ao longo de um forte gradiente climático no Brasil. No caso do trabalho 1 foram avaliados atributos físico dos solos (teores de argila, silte, areia total, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, etc.) amostrando-se os horizontes A e B do solo; e já no trabalho 2 os teores de P, K, Ca, Mg, S, e a granulometria do solo até onde houvesse ocorrência de raízes do eucalipto. Os valores potenciais de absorção de água (AD) aos 24 e 65 meses observados neste estudo foram superiores aos observados na literatura, indicando maior importância ou contribuição das raízes profundas na absorção de água do eucalipto na vida adulta. Por outro lado, os valores de AD aos 3 e 9 meses observados neste estudo foram inferiores aos observados na literatura, indicando que as raízes e a profundidade do solo são provavelmente subestimadas para os cálculos de AD nas idades mais jovens de eucalipto. Percebe-se que são necessários mais modelos sistêmicos que considerem e padronizem o AD de acordo com a idade e profundidade da raiz. Para concluir o estudo sobre distribuição vertical de raízes, este trabalho mostra uma exploração do solo muito profunda por raízes finas até uma profundidade de 20 m em plantações de eucalipto no Brasil. A distribuição vertical mostra claramente que os nutrientes estão concentrados na superfície do solo, mas há uma “fertilidade profunda do solo” que muitas vezes não é considerada na amostragem operacional nos sistemas de recomendação de fertilização das empresas florestais brasileiras, nem estão descritos nos principais manuais de agricultura e recomendação de fertilização no Brasil. Também na distribuição vertical, pode-se verificar que com o aumento do número de rotações e anos de ocupação dos solos com os plantios florestais, ocorre a hipótese do “aumento de nutrientes (P, K, B)”. Por outro lado, com o aumento da profundidade do sistema radicular constatou uma redução do estoque de nutrientes na superfície dos solos.

Palavras-chave: Atributos químicos e físicos do solo. Raízes das camadas profundas do solo. *Eucalyptus* sp. Plantações florestais.

ABSTRACT

The root development in eucalyptus plantations has been pointed out as one of the crucial strategies for their adaptation and growth, especially in tropical conditions, which have nutrient poor soils. In this context, it is extremely important to evaluate the soil profile in these plantations, considering a nutrient and water supply perspective for eucalyptus plantations. With this in mind, specifically in this thesis, two studies were conducted to evaluate soil attributes and root development in eucalyptus plantations in Brazil, namely: 1) Availability of Soil Water in Eucalyptus Plantations in a Chronosequence, and their Relationships with the Productivity and Basic Density of Madeira and its Estimates through Artificial Neural Networks in Brazil; 2) Patterns and Vertical Distribution of Soil Attributes in Eucalyptus Plantation in Brazil. The complete experimental network has 34 experiments planted in a climatic gradient in Brazil and 2 sites in Uruguay, with 36 experimental sites in total. Sites were evaluated from low average annual increment ($13.7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, 61% below the national average of productivity), to sites with high productivity with an IMA of $67.2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ (92% above the national average of wood production). In work 1, 14 experiments were evaluated, and in the work 2, 4 experiments, all of them along a strong climatic gradient in Brazil. In the case of work 1, physical attributes of the soils (clay, silt, total sand, field capacity, permanent wilting point, etc.) were evaluated; soil A and B horizons were sampled; and already at work 2 the contents of P, K, Ca, Mg, S, and the grain size of the soil up to where there was occurrence of eucalyptus roots. Potential water absorption (AD) values at 24 and 65 months observed in this study were higher than those observed in the literature, indicating greater importance or contribution of deep roots in the eucalyptus water absorption in adult life. On the other hand, the AD values at 3 and 9 months observed in this study were lower than those observed in the literature, indicating that roots and soil depth are probably underestimated for AD calculations at younger eucalyptus ages. It is noticed that more systemic models are needed that consider and standardize AD according to root age and depth. To conclude the study on vertical root distribution, this work shows very deep soil exploration by fine roots to a depth of 20 m in eucalyptus plantations in Brazil. The vertical distribution clearly shows that nutrients are concentrated on the soil surface, but there is "deep soil fertility" that is often not considered in the operational sampling in the fertilization recommendation systems of Brazilian forest companies nor are they described in the main manuals and fertilization recommendation in Brazil. Also in the vertical distribution, it can be verified that with the increase of the number of rotations and years of occupation of the soils with the forest plantations, the hypothesis of the "increase of nutrients (P, K, B)" occurs. On the other hand, at deeper of the root system verified a reduction of the nutrient stock in the surface of the soils.

Keywords: Chemical and physical soil attributes. Roots of deep soil layers. *Eucalyptus* sp., Forest plantations.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 -** Produtividade das plantações de eucalipto em todo o Brasil aumentou em quatro vezes entre 1970 e 2015, como resultado da intensificação do manejo e desenvolvimento de genótipos de rápido crescimento. A taxa de aumento da produtividade está atualmente próxima de 0 (dados do IBA, 2015). Imagem de uma plantação típica de 7 anos de idade sendo colhida com produção de madeira de tronco ao longo da rotação (incremento médio anual) de 25 Mg ha⁻¹ ano⁻¹(aproximadamente 50 m³ ha⁻¹ano⁻¹)..... 17
- Figura 2 -** Zoneamento do índice de aridez do Brasil e do Uruguai e localização dos sítios do TECHS..... 19
- Figura 3 -** Mapas Kriged de raízes com menos de 1 mm de diâmetro (número de intersecções de raízes contadas em uma área de 25 cm² de parede de trincheira). Os poços foram perpendiculares ao plantio de linhas em uma cronossequência de plantios de *Eucalyptus grandis* até a profundidade de 6m em 1 e 2 anos após o plantio (A e B, respectivamente) e até uma profundidade de 10 m em 3,5 anos (C) e 6 anos de idade (D) encontra-se em solo arenoso (20% de argila). Densidades de raízes finas até uma profundidade de 10 m em um estande de 6 anos de idade em um solo argiloso também foram estudados (E). Os eucaliptos indicam a posição da árvore mais próxima (não na escala dos perfis do solo)..... 21
- Figura 4 -** Mapa pedológico e de localização dos sítios do TECHS no Brasil.... 31
- Figura 5 -** Esquema de uma repetição completa do experimento de estresse hídrico do TECHS com os 4 clones. As parcelas mensuradas foram as marcadas em amarelo que constituem as 80 plantas da parcela útil com chuva normal. Observe a linha de drenagem central. Dimensões de 144 m x 180 m (12 linhas por 60 plantas, 3 m x 3 m). 32
- Figura 6 -** A) Trincheira aberta no centro dos experimentos TECHS para a realização da coleta das amostras indeformadas; B) Separação dos horizontes A e B em Latossolo na região de Inocência (MS), Brasil... 36
- Figura 7 -** Esquema de amostragem do solo no campo nos quatro locais do TECHS. A) Ponto de coleta do solo (C) localizado entre os pontos de apoio 1, 2, 3 (pontos não coletados) para evitar pontos de coleta muito próximos às plantas e também pontos distantes dos troncos. B) Perfil do solo coletado até o momento em que as raízes foram observadas, exceto o sítio 13, que interrompeu a coleta a 2.000 cm de profundidade..... 38

Figura 8 -	A) distribuição em profundidade da densidade de raízes finas (DRF) aos 3, 9, 24, 65 meses de idade das plantações do clone A1 no estado de Mato Grosso do Sul, Brasil; B) distribuição profunda do potencial de absorção de água (AD %) aos 3, 9, 24, 65 meses de idade das plantações clone A1 no estado do Mato Grosso do Sul, Brasil.....	49
Figura 9 -	Esboço de uma repetição completa do teste de estresse hídrico do TECHS com o 1 clone (A1). Observe a linha de drenagem central. Dimensões totais de 21 m x 87 m (8 linhas por 30 plantas, espaçamento de 3,0 m x 3,0 m). Os gráficos entre as linhas vermelhas representam as parcelas destrutivas. A amostragem do solo ocorreu na parcela útil com precipitação normal na linha em amarelo.....	66
Figura 10 -	Mapa de solos do Brasil e localização dos quatro sítios do TECHS utilizados neste estudo.....	69
Figura 11 -	A) Coleta de solo com trado motorizado para amostragem de raízes finas; B) detalhe do torrão de solo contendo raiz.....	71
Figura 12 -	Esquema de amostragem de solo nos quatro locais do TECHS. A) Ponto de coleta do solo (C) localizado entre os pontos de apoio 1, 2, 3 (pontos não coletados) para evitar pontos de coleta muito próximos às plantas e também pontos distantes dos troncos. B) Perfil do solo coletado até o momento em que as raízes foram observadas, exceto o sítio 13, que interrompeu a coleta a 2.000 cm de profundidade.....	72
Figura 13 -	Esquema de coleta de solos mostrando os locais de coleta dentro da parcela útil e fora do sistema de exclusão de chuva do TECHS.	73
Figura 14 -	Amostras de solos coletadas nos sítios 13, 20, 22, e 30 do TECHS no Brasil organizadas verticalmente e na ordem decrescente.....	74
Figura 15 -	Distribuição vertical dos atributos do solo nos quatro sítios do TECHS no Brasil. A) = teor de fósforo no solo extraído pelo método de resina trocadora de cátions (mg dm^{-3}); B) = teor de potássio no solo extraído pelo método da resina trocadora de cátions (mg dm^{-3}), C) = teor de cálcio ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), D) = teor de boro no solo (mg dm^{-3}), E) = teor de cobre (mg dm^{-3}), F) = teor de zinco no solo (mg dm^{-3}), G) = teor de matéria orgânica (g dm^{-3}), H) CTC = capacidade de troca de cátions ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), I) = teor de sulfato (mg dm^{-3}), J) = teor de argila no solo (g kg^{-1}), L) = teor de silte no solo (g kg^{-1}), M = teor total de areia no solo solo (g kg^{-1}).....	85
Figura 16 -	Análise dos componentes principais do solo, clima e de volume do eucalipto. A) Projeção das variáveis nos fatores 1 e 2. B) Contribuição relativa dos atributos para a variância total. Em que:	91

TSP - K = porcentagem no topo do solo de potássio, TSP - P = porcentagem no topo do solo de fósforo, PTSR = profundidade total do sistema radicular, AOS = anos ocupação do solo, TSP - B = porcentagem no topo do solo de boro, TSP - Ca = porcentagem no topo do solo de cálcio, TSP - MO = porcentagem no topo do solo de matéria orgânica, VCCC = volume comercial com casca, P (mm) = precipitação anual, DEF (mm) = déficit hídrico do solo, ETP = evapotranspiração potencial (mm), Tm °C = temperatura média anual.....

Figura 17 - A) Anos de ocupação do solo antes da implementação do experimento de acordo com a contribuição relativa de nutrientes no topo do solo para fósforo, potássio e boro (variando de 0 a 1); B) profundidade total do sistema radicular (PTSR) de acordo com a contribuição relativa de nutrientes no topo do solo para fósforo, potássio e boro (variando de 0 a 1). Em que: AOS = anos ocupação do solo pela plantação florestal, TSP - P = porcentagem de fósforo no topo do solo, TSP - K = porcentagem de potássio no topo do solo, TSP - B = porcentagem de boro no topo do solo.....

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Os quatro genótipos de <i>Eucalyptus</i> na rede de experimentos TECHS, clima de origem em que cada clone foi desenvolvido durante os programas de melhoramento e onde foram selecionados.....	29
Tabela 2 -	Histórico do uso e ocupação do solo antes da instalação do TECHS.....	30
Tabela 3 -	Descrição climática de 14 sítios do TECHS para o período de crescimento (0 a 48 meses) apresentados neste trabalho.....	34
Tabela 4 -	Estatística descritiva dos atributos dendrométricos, de solo e climáticos em função de médias, medianas, valores mínimos e máximos, desvio padrão, coeficientes de variação, curtose, assimetria e teste de normalidade com classes de p-valor e normalidade para os sítios do TECHS no Brasil.....	54
Tabela 5 -	Características e acurácia das redes neurais artificiais ajustadas (RNA) para as variáveis capacidade de água disponível (CAD), absorção de água (AD), incremento médio anual (IMA), densidade básica da madeira (DB) ajustadas em função das variáveis independentes e variáveis solo-climáticas nos sítios do TECHS no Brasil.....	57
Tabela 6 -	Precisão da regressão ridge (RR) para a capacidade de água disponível (CAD), potencial de absorção de água (AD), incremento médio anual (IMA), densidade básica da madeira (DB) nos sítios do TECHS no Brasil.....	58
Tabela 7 -	Histórico de uso e ocupação do solo antes da instalação do TECHS.	67
Tabela 8 -	Descrição climática de 4 dos sítios do TECHS ao longo da condução do experimento. Dados coletados em estações meteorológicas próprias dos sítios.....	70
Tabela 9 -	Média, desvio padrão e coeficiente de variação obtidos nos sítios TECHS 13, 20, 22 e 30 em função dos teores de fósforo, potássio, cálcio, boro, cobre, zinco, matéria orgânica, capacidade de troca de cátions, sulfato, argila, silte, e areia total no topo e no subsolo.....	81
Tabela 10 -	Estoque de nutrientes e matéria orgânica do solo no topo do solo (STS), estoque total de nutrientes e contribuição relativa dos nutrientes presentes na camada superficial geralmente amostrados pelas empresas florestais brasileiras nos quatro sítios do TECHS no Brasil.....	88

Tabela 11 -	Modelos locais e globais para predição dos teores de fósforo, potássio, cálcio, boro, cobre, zinco, matéria orgânica, capacidade de troca catiônica, sulfato, argila, silte e areia total em função dos atributos do solo e da camada de profundidade do solo.....	90
--------------------	--	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

AD (mm)	Água Disponível para o plantio em mm
AD (%)	Água Disponível para o plantio em %
AF	Teor de Areia Fina
ARG	Teor de Argila no Solo
ARM	Armazenamento de Água no Solo
AT	Teor Total de Areia no Solo
BD	Densidade Básica da Madeira
CAD (mm)	Capacidade de Água Disponível no Solo
CC	Capacidade de Campo
DCR	Densidade do Comprimento de Raiz
DEF (mm)	Déficit Hídrico de Água no Solo
DS	Densidade do Solo
DP	Densidade de Partícula
DRF	Densidade de Raízes Finas
ETP (mm)	Evapotranspiração Potencial
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IPEF	Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais
PCA	Análises de Componentes Principais
PT	Porosidade Total do Solo
PMP	Ponto de Murcha Permanente
PTSR	Profundidade Total do Sistema Radicular
RER	Taxa de Alongamento da Raiz
SLT	Teor de Silte no Solo
STS	Estoque de Nutrientes e Matéria Orgânica no Topo do Solo
TECHS	Tolerância de <i>Eucalyptus</i> Clonais aos Estresses Hídricos e Térmicos
TSP 50cm)	Proporção de Nutrientes e de Matéria Orgânica do Topo do Solo (0-
Unesp	Universidade Estadual Paulista

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	PLANTAÇÕES DE EUCALIPTOS EM UM CONTEXTO GERAL	16
2.2	O PROJETO TECHS E SUAS FERRAMENTAS PARA MELHORAR A PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO E REDUZIR A RESPOSTA DA SECA..	17
2.3	O SISTEMA RADICULAR E A DISPONIBILIDADE DA ÁGUA E NUTRIENTES PARA AS PLANTAÇÕES DE EUCALIPTOS	19
2.4	REGRESSÕES ATRAVÉS DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS E MÉTODOS DE COVARIÂNCIA	22
3	DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NO SOLO EM PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO EM UMA CRONOSSEQUÊNCIA	24
3.1	INTRODUÇÃO	26
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.2.1	<i>Caracterização Geral do Experimento</i>	28
3.2.2	<i>Amostragem de Solo</i>	35
3.2.3	<i>Metodologia de Amostragem de Raízes Finas</i>	37
3.2.4	<i>Relação entre Densidade de Raízes e Absorção de Água</i>	39
3.2.5	<i>Avaliações Dendrométricas</i>	40
3.2.6	<i>Análises Estatísticas (descritiva e teste de médias)</i>	42
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
3.3.1	<i>Potencial de Absorção de Água</i>	46
3.3.2	<i>Potencial de absorção de água e suas relações com a água disponível para plantações de eucalipto</i>	49
3.3.3	<i>Comparação entre estimativas de RNA e RR</i>	55
3.4	CONCLUSÕES	60
4	PADRÕES E DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO ATÉ 20 M DE PROFUNDIDADE EM PLANTAÇÕES CLONAIS DO <i>EUCALIPTO UROPHYLLA</i> NO BRASIL	61
4.1	INTRODUÇÃO	63
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS	65
4.2.1	<i>Caracterização Experimental geral</i>	65
4.2.2	<i>Caracterização Edafoclimática</i>	68
4.2.3	<i>Coleta de Solos</i>	70

4.2.4	<i>Análises de Solos</i>	75
4.2.5	<i>Análises Estatísticas</i>	77
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
4.4	CONCLUSÕES	97
	REFERÊNCIAS	98
	AGRADECIMENTOS	109
	ANEXOS	110

1 INTRODUÇÃO GERAL

As plantações clonais são hoje uma regra nas plantações de eucaliptos, tanto nas áreas tradicionais de produção como nas novas fronteiras florestais. No entanto, enquanto nas áreas tradicionais há maior segurança quanto à adaptação e capacidade produtiva dos clones, em novas áreas há maiores riscos de perda de produtividade devido a estresses ambientais diferentes daqueles de onde os clones foram selecionados.

Neste sentido, o projeto TECHS (Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídrico e Térmico) é um programa cooperativo criado por 42 instituições, com 26 empresas florestais presentes no Brasil e no Uruguai, e 16 instituições de pesquisa no Brasil, EUA, Chile.

Entre os principais estresses ambientais que afetam negativamente a produtividade do eucalipto, três se destacam por estarem presentes nas novas fronteiras florestais, a saber:

i) Estresse hídrico, principalmente no centro-oeste, norte, nordeste e parte do sudeste do Brasil;

ii) Estresse térmico relacionado a altas temperaturas (acima de 36°C) no Brasil tropical, ou a baixas temperaturas (abaixo de 5°C), no sul do Brasil e no Uruguai. Além disso, mesmo em áreas de plantio tradicionais, os efeitos das variações intra e interanuais da água e da temperatura devido às mudanças climáticas impõem uma maior compreensão da sensibilidade dos clones a essas tensões.

iii) Estresse relacionados ao solo em termos nutricionais e de suprimentos de água, pois o solo atua diretamente tanto no balanço hídrico da cultura do eucalipto, quanto no balanço e ciclo de nutrientes das plantações de eucalipto. Nesse sentido, buscou-se ao longo de um gradiente climático selecionar solos com características químicas e físicas de contração para entender as relações entre os atributos do solo e a resposta da seca.

Nesse sentido, muitos esforços já foram dedicados à compreensão dos fatores climáticos, ecofisiológicos que regem a produtividade do eucalipto e sua modelagem dendrométrica (BINKLEY *et al.*, 2017; HAKAMADA *et al.*, 2017; SCOLFORO *et al.*, 2019a; SCOLFORO *et al.* 2019b). No entanto, ainda existem estudos incipientes na plataforma TECHS que abordam a contribuição dos solos das camadas profundas

para a oferta de nutrientes, bem como o armazenamento de água para as plantações de eucalipto.

Especificamente nesta tese, dois estudos foram conduzidos para avaliar os atributos do solos e desenvolvimento radicular em plantações de eucalipto no Brasil, a saber:

Estudo 1: Disponibilidade de Água no Solo em Plantios de Eucalipto em uma Cronossequência e suas Relações com a Produtividade e Densidade Básica da Madeira e suas Estimativas Através de Redes Neurais Artificiais no Brasil.

Estudo 2: Padrões e Distribuição Vertical dos Atributos do Solo na Plantação de Eucalipto no Brasil. O objetivo do presente estudo foi caracterizar a distribuição vertical dos atributos do solo em camadas profundas de plantações de eucalipto no Brasil, e também gerar equações para estimar dos teores de atributos do solo das camadas profundas através dos teores observados nas camadas superficiais dos solos, facilmente acessíveis amostragens de solos convencionais (tradagens).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PLANTAÇÕES DE EUCALIPTOS EM UM CONTEXTO GERAL

Existem atualmente cerca de 20 milhões de hectares de eucaliptos plantados em todo o mundo (BOOTH, 2013). Desse total, cerca de 5,63 milhões de plantios de eucalipto (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2017) estão presentes no Brasil, ou seja, cerca de 28% de todas as plantações de eucalipto no mundo.

No Brasil, as plantações de eucalipto estão localizadas principalmente nos estados de Minas Gerais (24%), São Paulo (17%) e Mato Grosso do Sul (15%), um estado que liderou essa expansão, registrando um aumento de 400 mil ha nos últimos cinco anos, com taxa média de crescimento de 13% ao ano (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2017). No caso específico do Mato Grosso do Sul, as áreas estão concentradas na parte leste do estado, devido ao baixo valor relativo das terras, abrangendo os municípios de Três Lagoas e Ribas do Rio Pardo (SANTOS, 2011a). Assim, seu cultivo ocupou novas regiões do país, além das tradicionais, como as do sul e do sudeste (SANTANA *et al.*, 2008).

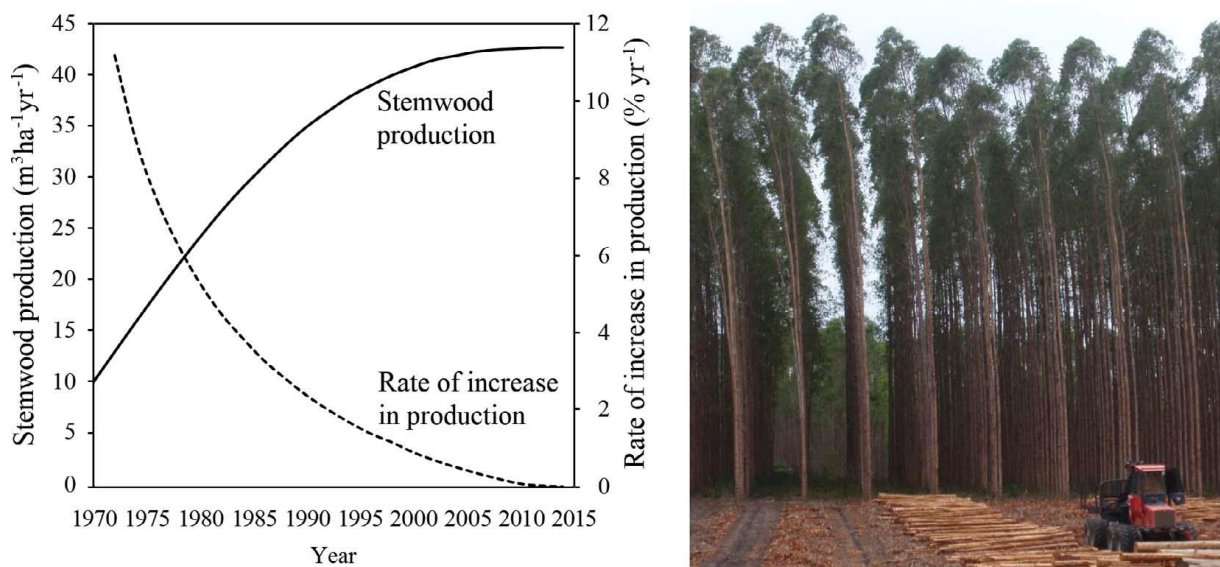
Assim, as florestas plantadas de eucalipto se expandiram em regiões que apresentam solos de baixa fertilidade natural e acentuado déficit hídrico, como no bioma Cerrado (GAVA *et al.*, 1997; ALVES, 2011). Em alguns casos, a silvicultura está se expandindo até mesmo em áreas de transição entre o cerrado, a caatinga e as florestas amazônicas (IBÁ, 2017), regiões estas ainda menos informações em relação ao manejo florestal adequado.

Neste sentido, a rápida expansão da silvicultura brasileira traz a necessidade de ter menores demandas de área, além de garantir altos níveis de produtividade. As dificuldades na obtenção de terra em grandes quantidades para a silvicultura, assim como os altos preços da rápida inflação da terra pressionados pela produção de alimentos e pela pecuária (IBÁ, 2015; SILVA; HERNANDEZ, 2015) são notórios.

Neste contexto, o Brasil deixou de ser o país mais competitivo em termos de custo de produção de madeira, perdendo para países como Rússia, Indonésia e Estados Unidos, devido à inflação intrínseca emergente do setor (CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA - CEPEA, 2017). De forma detalhada, isto ocorreu em função dos elevados preços da terra, insumos e mão-de-obra nos últimos anos (IBÁ, 2015), bem como a migração de plantações para áreas

marginais, onde o conhecimento sobre solos e produtividade florestal nesses ambientes ainda é muito limitado (FERRAZ *et al.*, 2013). Por isso, o setor de florestas plantadas do Brasil passa por um processo de estagnação do aumento de produtividade (BINKLEY *et al.*, 2017) na última década (Figura 1).

Figura 1 - Produtividade das plantações de eucalipto em todo o Brasil aumentou em quatro vezes entre 1970 e 2015, como resultado da intensificação do manejo e desenvolvimento de genótipos de rápido crescimento. A taxa de aumento da produtividade está atualmente próxima de 0 (dados do IBA, 2015). Imagem de uma plantação típica de 7 anos de idade sendo colhida com produção de madeira de tronco ao longo da rotação (incremento médio anual) de 25 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (aproximadamente 50 m³ ha⁻¹ ano⁻¹).



Fonte: Binkley *et al.* (2017).

Ou seja, se o aumento da produtividade não acompanha o aumento da inflação intrínseca do setor (NICKELL, 1995), e o setor / país perde competitividade em relação aos principais *players* do mercado mundial (FIGUEIREDO, 2008).

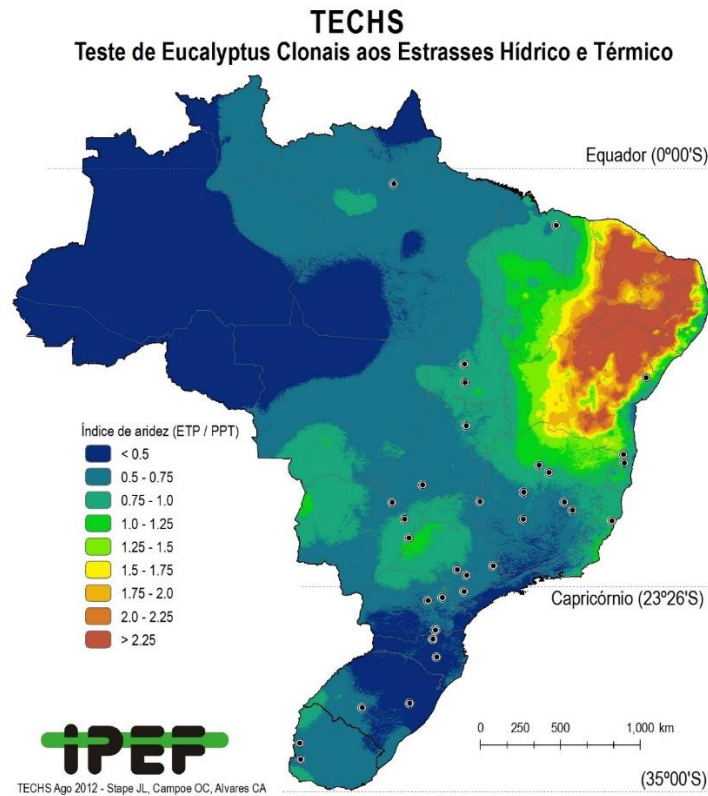
2.2 O PROJETO TECHS E SUAS FERRAMENTAS PARA MELHORAR A PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO E REDUZIR A RESPOSTA DA SECA

Uma das formas eficientes de reduzir o custo da madeira é aumentar a produtividade florestal, e uma das estratégias para alcançar esse objetivo é conhecer

os principais estresses ambientais para o eucalipto, e os respectivos fatores que reduzem a produtividade. Entre estes, dois se destacam pela associação com as novas fronteiras florestais, a saber: i) Estresse hídrico, principalmente no centro-oeste, norte, nordeste e parte do sudeste do Brasil; e ii) estresse térmico relacionado a altas temperaturas no Brasil tropical ou a baixas temperaturas no sul do Brasil. Assim, o programa cooperativo sobre Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídrico e Térmico (TECHS) foi proposto por meio de uma rede experimental bastante robusta instalada no Brasil e no Uruguai.

Rotineiramente no meio científico, um grande esforço científico é feito para isolar e quantificar esses fatores de produção florestal (BILLINGS, 1952; STAPE *et al.*, 2004; GONÇALVES *et al.*, 2012). Mas, às vezes, torna-se difícil e complexo separá-los, devido à confusão espacial e temporal intrínseca desses fatores e à produtividade das florestas plantadas (BILLINGS, 1952; STAPE *et al.*, 2010). Como todos os experimentos do TECHS foram plantados ao mesmo tempo, possíveis confundimentos temporais são reduzidos, e a questão espacial está sendo muito bem avaliada devido ao fato de que os TECHS estão localizados em 33 locais no Brasil e no Uruguai (Figura 2), em um forte gradiente climático.

Figura 2 - Zoneamento do índice de aridez do Brasil e do Uruguai e localização dos sítios do TECHS.



Fonte: Stape *et al.* (2014).

Neste sentido, percebe-se claramente o grande potencial do TECHS para avaliar os fatores responsáveis pelo aumento da produtividade, incluindo os fatores edáficos e os relacionados aos mecanismos de desenvolvimento radicular do eucalipto.

2.3 O SISTEMA RADICULAR E A DISPONIBILIDADE DA ÁGUA E NUTRIENTES PARA AS PLANTAÇÕES DE EUCALIPTOS

As raízes das plantas são um dos principais meios para acessar os recursos do solo, e seu comprimento e número são indicadores da capacidade de absorção de água e nutrientes (FREITAS *et al.*, 2008). A absorção de água pelas raízes profundas é geralmente considerada um meio eficaz de adaptação à seca nos trópicos e florestas subtropicais (CHRISTINA *et al.*, 2017). Especialmente para os ecossistemas florestais, a profundidade do solo exerce um grande efeito sobre a dinâmica sazonal

das raízes, uma vez que as árvores têm a capacidade de absorver água e nutrientes das camadas profundas.

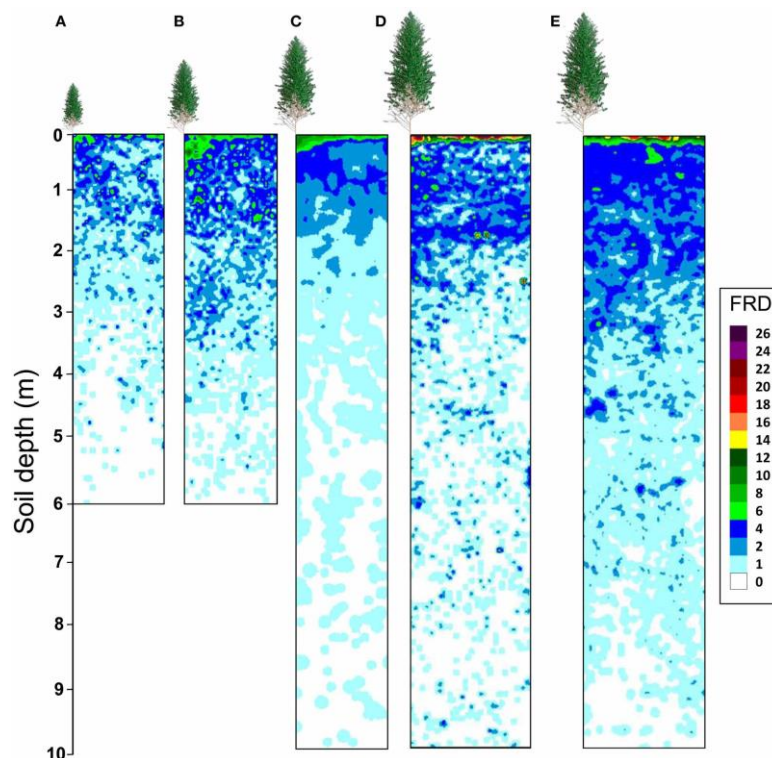
Isso é muito importante em países tropicais que possuem um período seco bem definido e alta evapotranspiração, por exemplo, nas regiões de Cerrado do Brasil ou nas regiões áridas da Austrália (ALVARES *et al.*, 2013, FLORES *et al.*, 2016). O enraizamento profundo pode aumentar a taxa de sobrevivência das plântulas à seca prolongada nas florestas mediterrânicas (PAZ, 2003; PADILLA; PUGNAIRE, 2007). Essas florestas possuem um sistema de raízes com alta densidade de raízes superficiais (LACLAU *et al.*, 2013) e raízes com mais de 18 m de profundidade, sendo essa profundidade máxima aproximadamente proporcional à altura do dossel (CHRISTINA *et al.*, 2011).

No trabalho de Bakker *et al.* (2006), embora a produção de biomassa de raízes finas de *Pinus pinaster* não tenha sido significativamente diferente em locais secos e úmidos em locais secos, a produção atingiu 1382 g m⁻², enquanto no local úmido apenas 545 g m⁻². Konôpka *et al.* (2006) observaram em *Cryptomeria japonica*, um alto poder de absorção de água e nutrientes no verão. Além disso, eles descobriram que a produção de raízes finas em maior quantidade foi devido ao estresse hídrico ou à predominância da alocação de carbono no solo orgânico, enquanto a taxa de mortalidade dessas raízes finas foi menor até o final do verão. Assim, os autores concluíram que a produção e mortalidade de raízes finas de *Cryptomeria japonica* apresentaram variações sazonais entre período seco e chuvoso.

Laclau *et al.* (2001a) demonstraram alta heterogeneidade na distribuição espacial de *Eucalyptus* spp. e a redução de sua densidade com o aumento da profundidade (Figura 3). Este mesmo autor alerta que nestes ambientes torna-se muito importante avaliar o balanço hidráulico das culturas florestais para o correto manejo da água, considerando a perspectiva de que as raízes exploram as camadas profundas do perfil do solo. Entretanto, estudos e modelos que abordam a capacidade hídrica disponível para o cultivo de eucalipto (FERCHAUD *et al.*, 2015, FREYCON *et al.*, 2015) ainda são incipientes. Os estudos com raízes profundas não são muito fáceis de executá-los no campo, assumindo que as raízes da árvore atingem altas profundidades, por exemplo, estudos de Stone e Kalisz (1991) com profundidades máximas de enraizamento de 60 m para eucalipto. A grande importância do balanço

hídrico para a silvicultura consiste no melhor planejamento da prevenção de compactação das áreas, segurança hídrica da bacia hidrográfica, sustentabilidade econômica, o correto uso da água para as plantações florestais (SCARDUA, 2014).

Figura 3 - Mapas Kriged de raízes com menos de 1 mm de diâmetro (número de intersecções de raízes contadas em uma área de 25 cm² de parede de trincheira). Os poços foram perpendiculares ao plantio de linhas em uma cronossequência de plantios de *Eucalyptus grandis* até a profundidade de 6m em 1 e 2 anos após o plantio (A e B, respectivamente) e até uma profundidade de 10 m em 3,5 anos (C) e 6 anos de idade (D) encontra-se em solo arenoso (20% de argila). Densidades de raízes finas até uma profundidade de 10 m em um estande de 6 anos de idade em um solo argiloso também foram estudados (E). Os eucaliptos indicam a posição da árvore mais próxima (não na escala dos perfis do solo).



Fonte: Laclau *et al.* (2013).

Entretanto, apesar de seu papel fundamental no ecossistema, o funcionamento das raízes e dos solos das camadas profundas ainda é pouco compreendido devido às dificuldades impostas pelas técnicas utilizadas em seu estudo e, conseqüentemente, à falta de dados (JANSSENS *et al.*, 2002). Às dificuldades operacionais somam-se os altos custos dos trabalhos que envolvem os sistemas radiculares (KREJCI *et al.*, 1986; VOGT *et al.*, 1997).

2.4 REGRESSÕES ATRAVÉS DE REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS E MÉTODOS DE COVARIÂNCIA

Existem várias ferramentas de natureza estatística que podem ser adotadas para auxiliar no processamento de relações entre variáveis dependentes e independentes, dentre as mais utilizadas estão a regressão e a interpolação. Embora a estimação por regressão permita a determinação de uma equação que expresse o comportamento de uma dada variável dependente com menor complexidade e fácil interpretação, pode haver situações em que estas não sejam capazes de denotar tal desempenho pela falta de qualidade no ajuste ou ausência do mesmo.

A inteligência artificial é uma técnica que permite análises flexíveis e estimativas confiáveis. Seu uso está aumentando e fornece resultados adequados em Ciências Florestais, como estimativa de volume, altura de árvores e modelagem do crescimento e produção florestal (BINOTI, 2010).

Redes Neurais Artificiais (RNA), ou connexionismo, são modelos computacionais que simulam aproximadamente a estrutura, processamento de informação e aquisição de conhecimento do cérebro humano e sistema nervoso, apresentando uma memória associativa e distribuída capaz de estabelecer relações entre variáveis independentes para estimar variáveis dependentes (COELHO *et al.*, 2007). Matematicamente, trata-se de um sistema massivo e paralelo cujas unidades de processamento simples são os neurônios artificiais, dispostos em uma ou mais camadas e interligados entre si com pesos ajustáveis por um grande número de conexões (BULLINÁRIA, 2011). O RNA possui as seguintes características: analogia neurobiológica, mapeamento de entrada e saída, tolerância a falhas e ruído, adaptabilidade de pesos de conexão a modificações ambientais e a capacidade de generalizar o conhecimento assimilado por aprendizagem a um conjunto de dados desconhecidos (BINOTI, 2010).

Existe na literatura um conjunto de métodos de regressão para a estimação de valores ambientais, dentre eles: mínimos quadrados (LS), melhor predição linear não viesada (BLUP), BayesA e BayesB (MEUWISSEN *et al.*, 2001). A regressão não-paramétrica do kernel usando modelos aditivos generalizados (GIANOLA *et al.*, 2006), Bayesiano LASSO (PARC), Bayes B Accelerated (MEUWISSEN, 2009). A regressão de RKHS (Sistema reprodutivo Hilbert Spaces), Bayes C, BayesCt, BayesD, BayesDt (HABIER *et al.*, 2010), Regressão via *Partial Least Squares* (PLSR) (SOLBERG *et al.*, 2009), e Regressão via Componentes Principais (PCR) (SOLBERG *et al.*, 2009). Os métodos BLUP (regressão aleatória) LASSO e Bayes A e B pertencem à classe de regressão explícita. Por outro lado, o método RKHS pertence à classe de regressão implícita e é um método semi-paramétrico (GIANOLA; VAN KAAM, 2008; GIANOLA; CAMPOS, 2009).

O método dos mínimos quadrados (regressão fixa) é ineficiente devido a: impossibilidade de estimar todos os efeitos simultaneamente, uma vez que o número de efeitos a serem estimados é maior que o número de dados; estimar um efeito de cada vez e verificar sua significância, leva a superestimar os efeitos significativos; a precisão do método é baixa.

Habier *et al.* (2007) compararam os métodos de quadrados (denominados por eles como regressão fixa), BLUP (chamados por eles de regressão aleatória ou RR-BLUP ou Regressão Ridge ou da “cumieira”) e Bayes B, em termos de precisão seletiva a longo prazo, após várias gerações. Nessa situação, a precisão tende a melhorar na relação de parentesco na geração de estimativa de efeitos genômicos.

Neste sentido, optou-se neste trabalho pela comparação entre as RNA's e a RR para verificar o desempenho destas técnicas estatísticas para realizar a regressão entre os atributos de solos, plantas e a CAD do solo.

3 DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NO SOLO EM PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO EM UMA CRONOSSEQUÊNCIA

RESUMO

Florestas tropicais (nativas e plantadas) são muito dependentes de fatores hídricos. Diante disso, o conhecimento sobre o balanço hídrico das florestas tropicais para o manejo correto da água torna-se muito importante considerando a perspectiva de que as raízes exploram as camadas profundas do perfil do solo. Entretanto, estudos e modelos que abordam a capacidade hídrica disponível para o cultivo de eucalipto ainda são incipientes e não consideram a eficiência de absorção das raízes. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a disponibilidade de água no solo em plantios de eucalipto em uma cronosequência, relações com produtividade e densidade básica da madeira e suas estimativas através de redes neurais artificiais (RNA) no Brasil. Dois ensaios de campo foram realizados para estimar a água disponível no solo para o plantio de eucalipto (AD). O primeiro estudo avaliou a densidade de raízes finas (DRF) em uma cronosequência para quantificar a captação potencial de água pelas raízes. O segundo avaliou a caracterização da capacidade hídrica do solo disponível (CAD) através da quantificação do ponto de murcha permanente (PMP) e capacidade de campo (CC) em 14 sítios florestais no Brasil. A partir das variáveis de solos e de densidades de raízes finas, foram realizadas regressões através de redes neurais artificiais (RNA) e Regressão Ridge (RR), e respectivas comparações de acurácia entre as respectivas metodologias. Os AD nas idades de 3, 9, 24, 65 meses foram, respectivamente, 17,3%, 59,8%, 28,5%, 21,8%, com uma média geral de 26% em todos os estratos. Nenhuma camada foi observada com 100% de AD, uma vez que os valores de DRF observados neste trabalho foram baixos em comparação com culturas anuais, como cereais. Não foram observadas diferenças significativas entre os horizontes (A e B) com nível de significância de 5%. Uma grande variação nos valores de CAD e AD foi observada com um coeficiente de variação de 43%. Os valores de AD aos 24 e 65 meses observados neste estudo foram superiores aos observados na literatura. Este fato indica maior importância ou contribuição de raízes profundas na absorção de água do eucalipto na idade adulta. Por outro lado, os valores de AD aos 3 e 9 meses observados neste estudo foram inferiores aos observados na literatura, indicando que as raízes e a profundidade do solo são provavelmente subestimadas para os cálculos de AD nas idades mais jovens de eucalipto. Percebe-se que são necessários mais modelos sistêmicos que considerem e padronizem o AD de acordo com a idade e profundidade da raiz. O incremento médio anual (IMA) apresentou correlação não significativa com a densidade básica da madeira (DB) ($R = -0,17$, $p = 0,078$), uma vez que os clones utilizados neste estudo mostraram homogeneidade nas DB's. Observaram-se correlações negativas entre DB e déficit hídrico no solo ($R = -0,25$, $p = 0,017$), o que se justifica pelo baixo crescimento, redução no acúmulo de carbono e redução do tamanho das plantações de eucalipto em locais secos. As estimativas de CAD, AD, IMA, DB realizadas com RNA foram mais precisas do que aquelas com RR.

Palavras-chave: Absorção de água. CAD do solo. Florestas plantadas. Regressão ridge e redes neurais.

ABSTRACT

Tropical forests (native and planted) are very dependent on water factors. In view of this, knowledge about the water balance of tropical forests for the correct water management becomes very important considering the perspective that the roots explore the deep layers of the soil profile. However, studies and models that address the available water capacity for eucalyptus cultivation are still incipient and do not consider the root absorption efficiency. The objective of the present work was to evaluate the availability of soil water in eucalyptus plantations in a cronossequence, relations with productivity and basic wood density and its estimates through artificial neural networks (ANN) in Brazil. Two field trials were carried out to estimate the water available in the soil for eucalyptus plantation (PWA). The first study evaluated the fine root density (FRD) in a chronosequence to quantify the potential uptake of water by the roots. The second evaluated the characterization of the available soil water capacity (AWC) through the quantification of the permanent wilt point (PWP) and field capacity (FC) in 14 forest sites in Brazil. PWA at the ages of 3, 9, 24, 65 months were, respectively, 17.3%, 59.8%, 28.5%, 21.8%, with an overall mean of 26% in all strata. No layer was observed with 100% PWA, since the FRD values observed in this work were low compared to annual crops, such as cereals. No significant differences were observed between the horizons (A and B) with a significance level of 5%. A large variation in the values of AWC and PWA was observed with a coefficient of variation of 43%. The PWA values at 24 and 65 months observed in this study were higher than those observed in the literature. This fact, indicating greater importance or contribution of deep roots in the eucalyptus water absorption in adulthood. On the other hand, PWA values at 3 and 9 months observed in this study were lower than those observed in the literature, indicating that roots and soil depth are probably underestimated for PWA calculations at younger eucalyptus ages. It is noticed that more systemic models are needed that consider and standardize the PWA according to the age and depth of the root. The AAI presented a non-significant correlation with BWD ($R = -0.17$, $p = 0.078$), since the clones used in this study showed homogeneity in BWD. We observed negative correlations between BWD and SWD ($R = -0,25$, $p = 0,017$) which is justified by the low growth, reduction in carbon accumulation, and reduction of eucalyptus plantation size in dry places. The estimates of AWC, PWA's, AAI, BWD performed with ANN were more accurate than those with RR.

Keywords: Water absorption. CAD of soil. Planted forests. Regression ridge and neural networks.

3.1 INTRODUÇÃO

A dinâmica do sistema radicular de uma planta é de extrema importância para definições de técnicas de manejo das plantações florestais (FREITAS *et al.*, 2008; CHRISTINA *et al.*, 2017). Isto tem aplicações práticas para o manejo da adubação e do manejo de água, pois tanto a lixiviação dos nutrientes e a absorção de água dependem da presença de raízes finas no solo.

Observando a importância do sistema radicular de uma planta e a escassez de estudos sobre o assunto, torna-se muito importante entender as relações e a dinâmica do sistema radicular das árvores com relação aos fatores ambientais que influenciam a produção de raízes finas, aos recursos disponíveis no solo, às variações na longevidade das raízes e nos processos de senescência e substituição das raízes finas.

A proliferação de raízes finas na camada da superfície orgânica do solo no ecossistema florestal é vista como uma estratégia para adquirir nutrientes em solos inférteis, nos quais há limitação de nutrientes. Isso é muito importante em floresta tropical, onde a maioria dos solos são altamente intemperizados, e a camada de raízes, frequentemente desenvolve-se dentro da camada orgânica para captura, ao longo do ano, de nutrientes produzidos pela decomposição da matéria orgânica (LACLAU *et al.*, 2004).

Witschoreck *et al.* (2003), trabalhando com *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, observaram que 72,8% das raízes finas menores que 2 mm e 76,1% do comprimento dessas raízes se concentravam nos primeiros 30 cm do solo, ocorrendo redução da densidade do sistema radicular com o aumento da profundidade. Usman *et al.* (1999) observaram 58 e 59% das raízes finas na camada de 0-20 cm, 28 e 32% na camada de 20-40cm e 13 e 10% na profundidade de 40-60cm para *Quercus leucotrichophora* A. Camus Ex. Bahadur e *Pinus roxburghii* Sarg., respectivamente. Segundo Witschoreck *et al.* (2003), a concentração de raízes finas na camada superior do solo está correlacionada com concentrações mais altas de matéria orgânica e nutrientes, e com as condições físicas favoráveis desta camada. Sayer *et al.* (2006) observaram que, independentemente da quantidade de camada orgânica presente no solo, a presença e a quantidade de serapilheira aumentam a colonização de raízes finas nesta camada.

Neste sentido, torna-se de grande relevância científica e operacional para as empresas de base florestal, desenvolver e propor equações e métodos estatísticos para estimar o potencial de absorção de água e nutrientes nas camadas profundas, visto as dificuldades de acesso às raízes profundas, por vários motivos já discutidos anteriormente. Neste escopo, existem várias ferramentas de natureza estatística que podem ser adotadas para auxiliar neste processamento, e dentre as mais utilizadas estão a regressão e a interpolação. Embora a estimação por regressão permita a determinação de uma equação que expresse o comportamento de uma dada variável dependente com menor complexidade e fácil interpretação, pode haver situações em que estas não sejam capazes de denotar tal desempenho pela falta de qualidade no ajuste ou ausência do mesmo.

Para contornar tal problema, a inteligência artificial é uma técnica que permite análises flexíveis e estimativas confiáveis. Seu uso está aumentando e fornece resultados adequados em Ciências Florestais, como estimativa de volume, altura de árvores e modelagem do crescimento e produção florestal (BINOTI, 2010).

As RNA's, ou conexionismo, são modelos computacionais que simulam aproximadamente a estrutura, processamento de informação e aquisição de conhecimento do cérebro humano e sistema nervoso, apresentando uma memória associativa e distribuída capaz de estabelecer relações entre variáveis independentes para estimar variáveis dependentes (COELHO *et al.*, 2007). Matematicamente, trata-se de um sistema massivo e paralelo, cujas unidades de processamento simples são os neurônios artificiais, dispostos em uma ou mais camadas e interligados entre si com pesos ajustáveis por um grande número de conexões (BULLINÁRIA, 2011). O RNA possui as seguintes características: analogia neurobiológica, mapeamento de entrada e saída, tolerância a falhas e ruído, adaptabilidade de pesos de conexão a modificações ambientais e a capacidade de generalizar o conhecimento assimilado por aprendizagem a um conjunto de dados desconhecidos (BINOTI, 2010).

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a disponibilidade de água no solo em plantios de eucalipto em uma cronossequência, relações com produtividade e densidade básica da madeira e suas estimativas através de redes neurais artificiais no Brasil.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 Caracterização Geral do Experimento

Um grupo de melhoristas das empresas florestais que participaram do TECHS definiram um grupo de 18 clones de eucalipto. Estes clones representavam os diferentes materiais genéticos em uso naquela época (2011), mas com características de espécies diferentes, suscetibilidade a estresses hídricos e térmicos. A diversidade de comportamentos ecofisiológicos dentro de níveis apropriados de produtividade foi um dos critérios de escolha destes materiais genéticos. Todas as medições e informações desses clones foram compartilhadas entre as empresas participantes do TECHS para definir o grupo de clones a serem usados no TECHS.

Devido à grande amplitude climática do Brasil, os clones foram divididos em 4 grupos: a) Clones tropicais e de regiões Úmidas (Tipo U); b) clones e regiões tropicais mais secas (tipo S); c) Clones de regiões subtropicais mais frias (Tipo F); e d) clones intermediários e mais maior adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas (tipo P). Neste trabalho, foram utilizados apenas 4 clones com maior adaptabilidade ou comumente chamados de clones “plásticos”, por serem clones amplamente plantados operacionalmente nas empresas florestais, a saber: A1, C3, K2, Q8. As principais características genéticas e alguns parâmetros climáticos dos clones utilizados nesses estudos são apresentados, segundo dados de Flores *et al.* (2016) e Binkley *et al.* (2017) (Tabela 1).

Tabela 1 - Os quatro genótipos de *Eucalyptus* na rede de experimentos TECHS, clima de origem em que cada clone foi desenvolvido durante os programas de melhoramento e onde foram selecionados.

Clones	Espécies	Temperatura Média Anual (°C)	Precipitação (mm)	Clima	Ocorrência natural	Clima em que o clone foi selecionado
A1	<i>E. urophylla</i>	16-27	1000-2000	Tropical e Subtropical	Predominantemente Aw, e ocorrência menor em clima Af, Am, Cwa e Cwb	Cwa
C3 ¹	<i>E. grandis</i> x <i>E. camaldulensis</i>	15-22 e 16-27	800-2000 e 500-1500	Tropical e Subtropical	<i>E. grandis</i> - Predominantemente Cfa, e em menor extensão em clima Cwa, Cwb and Cfb. <i>E. camaldulensis</i> - predominante Aw, e menos extensão em clima As, Cwa, Cwb	As
K2	<i>E. saligna</i>	13-18	900-1400	Subtropical	Predominantemente em Cfb, Cfa, Cwb	Cfb
Q8	<i>E. grandis</i>	15-22	800-2000	Subtropical	Predominantemente em Cfa, e menor extensão em clima Cwa, Cwb e Cfb.	Af

¹ O clone C3 é um híbrido de *E. grandis* x *E. camaldulensis* e, portanto, os parâmetros climáticos das duas espécies foram descritos.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As plantações foram implantadas em áreas de reflorestamento (*Eucalyptus* sp. E *Pinus* sp.), pastagem geralmente com gramíneas, bem como em áreas de Cerrado (Tabela 2). O número de rotações variou de 1 a 5, e a duração média da rotação da floresta foi entre 6 e 7 anos. O preparo do solo foi realizado conforme o operacional das empresas florestais brasileiras, cuja média variava de 40 a 50 cm de profundidade, e o estrondamento lateral de 70 cm, utilizando o subsolador / escarificador para preparo do solo, em linhas paralelas. Essas informações serão importantes para justificar o conteúdo dos atributos do solo, bem como os resultados de produtividade apresentados neste trabalho.

Buscou-se através dos técnicos / representante das empresas florestais, descrever o histórico de uso e ocupação do solo antes da instalação do experimento TECHS. Observa-se que os anos de ocupação do solo (AOS) das áreas de plantações no Brasil variam de áreas muito novas (implantação em áreas de Cerrado) a áreas com 45 anos de plantações de eucalipto. Esses dados retratam bem a realidade do Brasil entre as áreas tradicionais de plantio com amplo conhecimento de silvicultura e

alto nível tecnológico utilizado na produção de madeira (por exemplo, TECHS 20 como local tradicional para áreas florestais), para áreas de fronteira silvicultural com pouco conhecimento em termos de solo e condições climáticas (por exemplo, o TECHS 13 como um local de fronteira florestal).

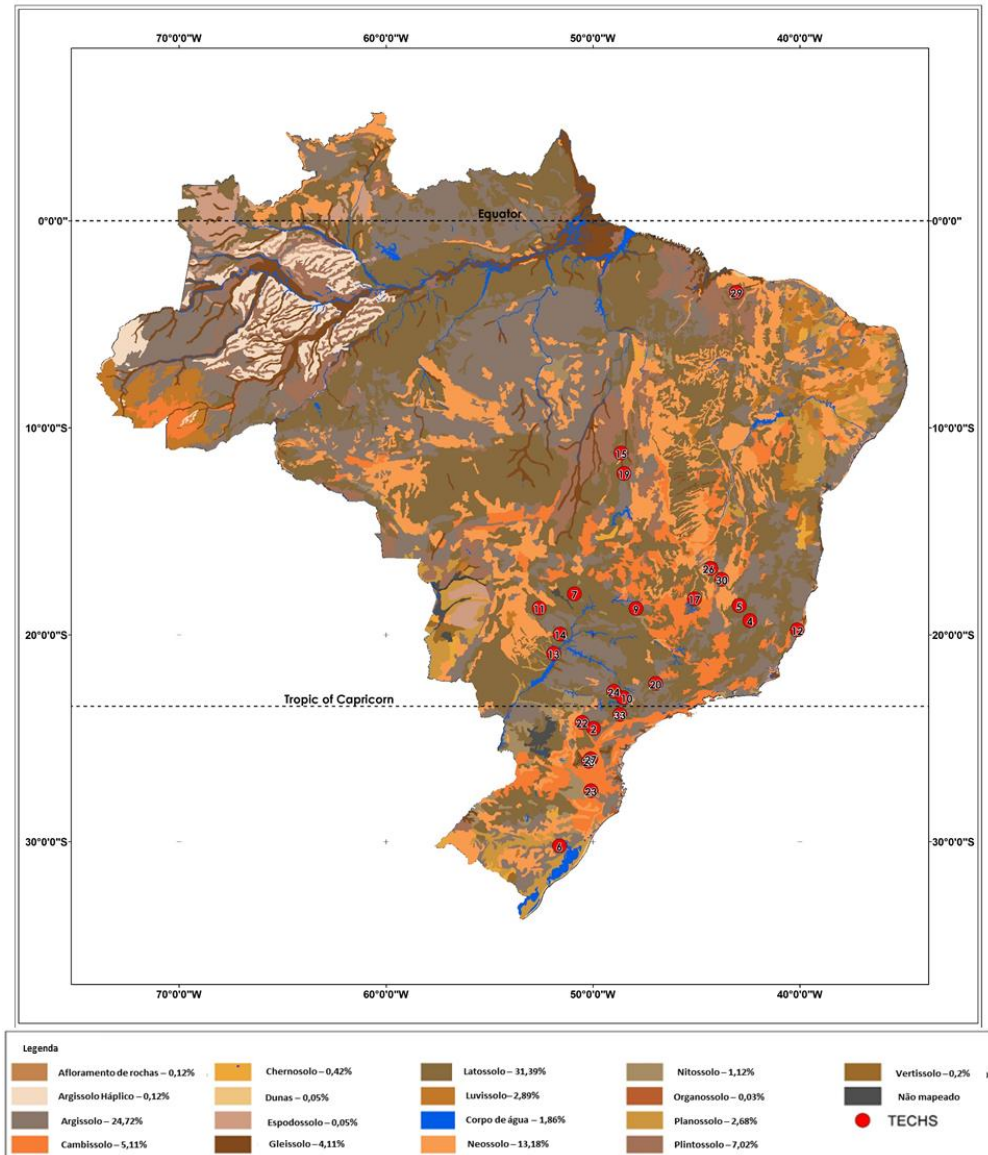
A ordem de solo com maior ocorrência entre os experimentos foi o Latossolo (67%), seguida de Neossolo (21%), Argissolo (8%) e Cambissolo (4%). De acordo com o mapeamento mais atualizado de solos no Brasil (SANTOS *et al.*, 2011b), os Latossolos ocorrem em aproximadamente 31% do território brasileiro, e isso mostra que as áreas florestais são geralmente deslocadas para áreas marginais com menor fertilidade natural e solos altamente intemperizados, mas profundos, como é o caso dos Latossolos (Tabela 2 e Figura 4).

Tabela 2 - Histórico do uso e ocupação do solo antes da instalação do TECHS.

TECH S	Município	Estado	Ordem de Solo	Espécie / fitofisionomia antes da instalação do experimento	Anos de ocupação do solo (AOS)
2	Arapoti	PR	Latossolo	<i>Pinus sp.</i>	40 anos
4	Belo Oriente	MG	Latossolo	<i>Eucalyptus sp.</i>	40 anos
5	Guanhães	MG	Latossolo	<i>Eucalyptus sp.</i>	30 anos
7	Rio Verde	GO	Neossolo	<i>Eucalyptus sp.</i>	20 anos
9	Estrela do Sul	MG	Latossolo	<i>Pinus sp.</i>	35 anos
10	Botucatu	SP	Latossolo	<i>Eucalyptus sp.</i>	-
11	Chapadão do Sul	MS	Latossolo	Pastagem	-
14	Inocência	MS	Neossolo	Pastagem	-
20	Mogi-Guaçu	SP	Latossolo	<i>Eucalyptus sp.</i>	45 anos
22	Telemaco Borba	PR	Latossolo	<i>Eucalyptus sp.</i>	8 anos
23	Otacílio Costa	SC	Cambissolo	<i>Pinus sp.</i>	16 anos
24	Borebi	SP	Neossolo	<i>Eucalyptus sp.</i>	14 anos
29	Urbano Santos	MA	Neossolo	Cerrado	-
33	Buri	SP	Latossolo	<i>Eucalyptus sp.</i>	20 anos

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 4 – Mapa pedológico e de localização dos sítios do TECHS no Brasil.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Adaptado de Santos et al. (2011b).

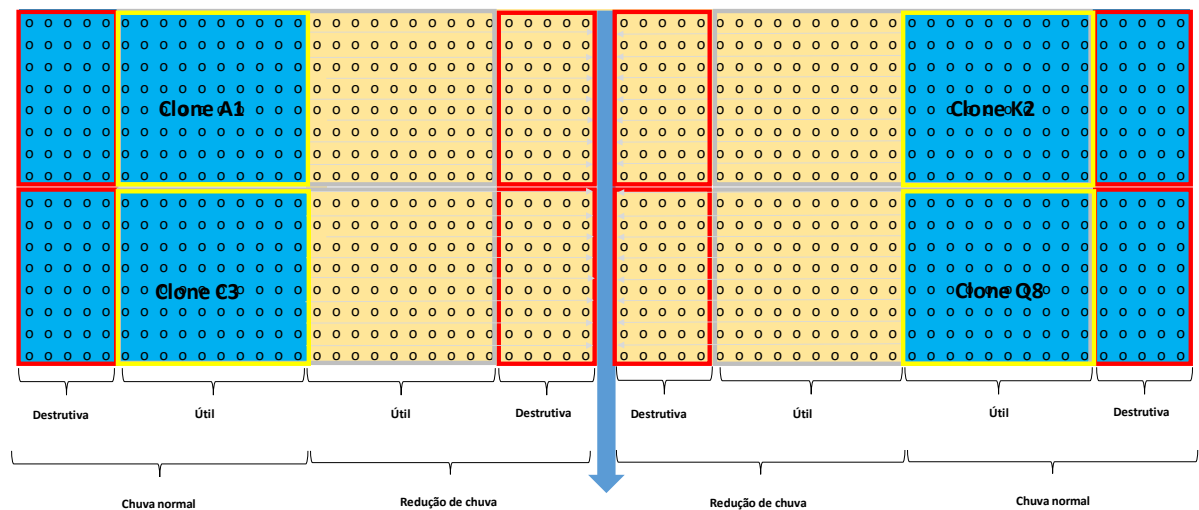
Foram geradas as recomendações de adubação em função das análises de solos realizadas antes do plantio dos experimentos, sendo que as amostras foram coletadas nas camadas de 0-40cm. Um “plus” de 10% foi acrescentado nas recomendações de adubação de todos os sítios do TECHS para garantir que não houvesse qualquer limitação nutricional nos experimentos. Neste sentido, todas as parcelas foram fertilizadas intensivamente durante o primeiro ano com 70 kg N ha⁻¹,

45 kg P ha⁻¹, 85 kg K ha⁻¹, 500 kg Ca ha⁻¹, 90 kg Mg ha⁻¹, 40 kg S ha⁻¹, 3 kg B ha⁻¹, 1 kg Cu ha⁻¹ e 1 kg Zn ha⁻¹. As fontes de fertilizantes utilizadas foram: NPK + micros, calagem e gessagem. O parcelamento de aplicação de fertilizantes variou entre os locais, com a aplicação total dividida entre 2 a 4 aplicações, desde o pré-plantio até 12 meses de idade. Herbicidas foram usados para manter as parcelas livres de plantas daninhas.

Cada clone foi plantado em parcela única, com 8 linhas x 30 árvores (tamanho de parcela de 24 x 90 m - 2160 m²), com árvores no espaçamento de 3 x 3 m (1111 plantas ha⁻¹). Uma borda de cada parcela tinha 5 linhas (cada uma com 8 árvores) disponíveis para amostragem destrutiva ao longo do projeto (Figura 5). Foram mensurados neste trabalho apenas as árvores presentes nas parcelas com chuva normal.

O diâmetro à altura do peito (DAP) e a altura total das 80 árvores centrais das parcelas com e sem chuva foram medidos, como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Esquema de uma repetição completa do experimento de estresse hídrico do TECHS com os 4 clones. As parcelas mensuradas foram as marcadas em amarelo que constituem as 80 plantas da parcela útil com chuva normal. Observe a linha de drenagem central. Dimensões de 144 m x 180 m (12 linhas por 60 plantas, 3 m x 3 m).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Estações meteorológicas foram instaladas em cada sítio do TECHS em 2012, o que nos permitiu registrar dados meteorológicos diariamente. Nos casos dos sítios que não possuíam estações meteorológicas próprias, utilizou-se então os dados da rede de estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Variáveis como temperatura média anual (T_m °C), precipitação média anual (P (mm)), déficit hídrico no solo (DEF (mm)), evapotranspiração potencial e real média anual (ETP e ETR (mm)) calculada pelo método Penman-Monteith usando a capacidade de armazenamento da água no solo no local específico de cada sítio segundo a metodologia proposta por Rolim *et al.* (1998) (Tabela 3).

Para a caracterização climática dos sítios optamos pela realização da classificação climática de Köppen (Köppen, 1936), como feito recentemente por Kottek *et al.* (2006), Peel *et al.* (2007) e Alvares *et al.* (2013), a fim de permitir reprodutibilidade da classificação climática para eventuais estudos futuros.

O Índice de Aridez foi calculado usando a fórmula sugerida pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (United Nation Environment Program - UNEP, 1992), que tem sido utilizada para a classificação de terras susceptíveis aos processos de desertificação, conforme a equação abaixo:

$$\text{Índice de aridez} = \frac{P \text{ (mm)}}{ETP \text{ (mm)}}$$

Os experimentos foram realizados em diferentes regiões do Brasil, com as regiões do sul (por exemplo, TECHS 22), sudeste (por exemplo, TECHS 4), centro-oeste (por exemplo TECHS 14) e norte (por exemplo TECHS 29). Um forte contraste entre a latitude foi observado nos locais deste experimento (por exemplo, TECHS 29 com latitude de $-3,40^\circ$ e TECHS 23 com latitude de $-27,50^\circ$). Outro ponto que pode ser destacado em relação às variações das condições ambientais experimentais é em relação à altitude no nível do mar, por exemplo, TECHS 29 com 81 metros em relação ao nível do mar, e TECHS 9 com 969 metros em relação ao nível do mar. Isso dá uma robustez estatística a esse trabalho, já que abrange praticamente todo o território brasileiro em termos climáticos.

Os locais apresentaram uma variação de cerca de 10°C ($17,1 - 27,5^\circ\text{C}$) entre os locais mais frios e mais quentes. A precipitação média anual variou de cerca de 609 a 1525 mm. Da mesma forma, os tipos climáticos variaram do clima tropical com

verão seco e mês mais seco com precipitação menor que 60mm, até o clima Cwb com clima subtropical com temperatura amena no verão e precipitação acima de 40mm no mês mais seco (ALVARES *et al.*, 2013).

Tabela 3 - Descrição climática de 14 sítios do TECHS para o período de crescimento (0 a 48 meses) apresentados neste trabalho.

TECHS	Lat.	Long.	Attitude (m)	Município	Estado	T.m °C	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	Classe	Classe climática Köppen	Índice de aridez
2	-24,5	-50,0	770	Arapoti	PR	18,4	1436	569	562	7	Subtropical	Cwb	Super úmido
4	-19,3	-42,4	243	Belo Oriente	MG	23,0	1065	1002	828	174	Tropical	Aw	Úmido
5	-18,6	-42,9	873	Guanhães	MG	21,0	1013	796	704	92	Tropical	As	Úmido
7	-18,0	-50,9	681	Rio Verde	GO	23,2	1319	1036	724	312	Tropical	Aw	Úmido
9	-18,7	-47,9	969	Estrela do Sul	MG	23,5	1334	1067	928	139	Tropical	Aw	Úmido
10	-23,0	-48,5	869	Botucatu	SP	21,4	1332	842	783	58	Tropical	Aw	Úmido
11	-18,7	-52,6	783	Chapadão do Sul	MS	22,8	1154	983	780	203	Tropical	Aw	Úmido
14	-20,0	-51,6	480	Inocência	MS	24,3	1026	1188	916	272	Tropical	Aw	Sub úmido
20	-22,4	-47,0	633	Mogi Guaçu	SP	22,3	1255	942	867	75	Tropical	Aw	Úmido
22	-24,2	-50,5	888	Telêmaco Borba	PR	17,8	1436	569	561	7	Subtropical	Cwb	Super úmido
23	-27,5	-50,1	870	Otacílio Costa	SC	17,1	1525	481	476	5	Subtropical	Cfa	Super úmido
24	-22,7	-49,0	656	Borebi	SP	22,0	1116	908	800	109	Tropical	Aw	Úmido
29	-3,4	-43,1	81	Urbano Santos	MA	27,5	878	1492	656	836	Tropical	Aw	Sub úmido
33	-23,9	-48,7	695	Buri	SP	20,0	1196	662	645	17	Subtropical	Cwb	Úmido

Tm °C = temperatura média anual, P (mm) = precipitação média anual, ETP (mm) = evapotranspiração potencial média anual calculada pelo método Penman-Monteith usando a capacidade de armazenamento da água no solo no local específico de cada sítio, ETR (mm) = evapotranspiração real anual média, DEF (mm) = déficit hídrico médio anual usando a capacidade de armazenamento de água no solo do local específico.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Foi quantificado o ponto de murcha permanente (PMP) em uma tensão de -1 500 kpa e a capacidade de campo (CC) foram determinados em uma tensão de -10 kpa em amostras de solo indeformadas para o cálculo da capacidade de água disponível (CAD). O CAD foi calculado pela diferença entre CC e PMP, conforme a equação abaixo:

$$CAD (mm) = (((\theta_{CC} \cdot DS) - (\theta_{PMP} \cdot DS)) \cdot DS \cdot 10) \cdot P$$

Em que:

CAD (mm) = capacidade de água disponível para a camada de 1 metro de profundidade.

θ_{CC} = umidade na capacidade de campo do solo em massa (kg kg^{-1}).

θ_{PMP} = umidade no ponto de murcha do solo em uma base massa (kg kg^{-1}).

DS = densidade do solo (g dm^3).

P = profundidade da camada de solo (cm).

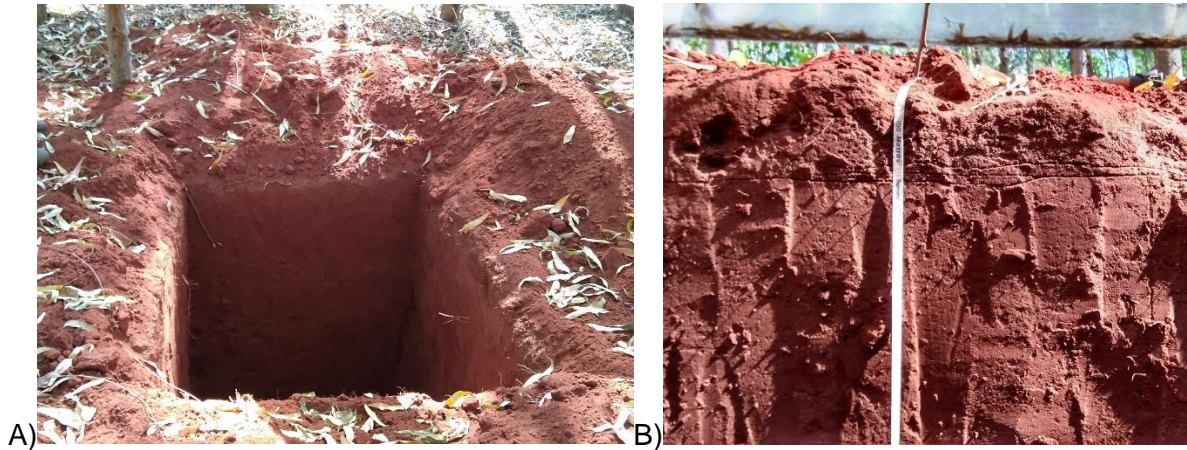
A densidade de partículas (DP) foi determinada pelos métodos do anel volumétrico, e a densidade do solo (DS), por meio do balão volumétrico, porosidade total (PT) dada pela equação $PT = 1 - (DP/DS)$ de acordo com a metodologia proposta pela EMBRAPA, 1997. Análise granulométrica foi realizada pelo método do densímetro (EMBRAPA, 1997), e as amostras foram dispersas com hexametáfosfato de sódio, argila (ARG), silte (SLT), areia grossa (AG), areia fina (AF), areia total (AT = AG + AF) granulometria foram consideradas. As amostras foram submetidas a duas cargas para determinação do ponto de apagamento permanente - PMP (-1500 kpa) e camada de campo CC (-10 kpa), conforme metodologia descrita pela EMBRAPA, 1997.

A CAD (mm) foi utilizada para obter os cálculos de armazenamento de água no solo (ARM), déficit hídrico do solo (DEF) e excesso de água no solo.

3.2.2. Amostragem de Solo

Os tratamentos do experimento consistiram de um esquema fatorial 2 x 2: climas tropicais e subtropicais; horizontes A e B (ou C dependendo da ordem de solo). Neste sentido, trincheiras com 2 metros de profundidade, 1,20 metros de largura e 1,50 metros de comprimento foram abertas no centro do experimento para realizar a coleta de amostras indeformadas, conforme a Figura 6. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com 3 repetições. O número de graus de liberdade para as análises estatísticas totalizou 12.

Figura 6 - A) Trincheira aberta no centro dos experimentos TECHS para a realização da coleta das amostras indeformadas; B) Separação dos horizontes A e B em Latossolo na região de Inocência (MS), Brasil.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As coletas de amostras indeformadas de solo ocorreram entre janeiro e julho de 2017. As plantações de eucalipto tinham idade entre 5,0 e 5,5 anos no momento da amostragem indeformada.

Um técnico / especialista da empresa ou de outra empresa vizinha (colaboradora) foi responsável pela identificação e separação dos horizontes para a coleta de amostras indeformadas. No caso do sítio 33 a coleta foi realizada por um pedólogo com a respectiva classificação do solo. Posteriormente, foi necessário realizar a coleta de solo nos dois horizontes de solo mais representativos (diagnóstico A e B ou A e C quando são solos do tipo Neossolo). Cada local do TECHS possuía seis amostras indeformadas, três das quais estavam no horizonte da superfície e tinham forte interferência de matéria orgânica, geralmente A, e três outras amostras no horizonte subsuperficial B (Bt, Bi, Bw, etc).

A sequência da atividade consistiu nas seguintes etapas: 1 - Posicionar horizontalmente o trecho Uhland (contendo um anel volumétrico previamente identificado - TECHS, Sítio, Horizonte, Repetição) no perfil de solo aberto,

especificamente no horizonte a ser amostrado; 2 - Mediante o levantamento e a punção do peso do curso do Uhland, foi coletada a amostra de solo, não permitindo que o solo chegasse ao topo do amostrador de Uhland, de forma que a porção superior da amostra de solo não se compactasse; 3 - O amostrador foi retirado do solo, puxando-o após girá-lo em seu curso; 4 - Com o auxílio de uma faca, a tampa protetora do anel foi aberta e a faca inserida na parte inferior do anel (entre o anel e a base do amostrador) para facilitar a remoção do anel; 5 - Com isso, o anel foi empurrado através do orifício no amostrador de Uhland para remover a amostra; 6 - Com o auxílio da faca, o excesso de solo aderido ao anel foi removido em ambas as extremidades, tornando as dimensões da amostra de solo consistentes com as dimensões internas do anel; 7 - O anel foi embalado com filme de PVC e colocado dentro de uma caixa de isopor para o respectivo transporte; 8 - O amostrador e a faca foram limpos; 9 - Outro anel previamente identificado no amostrador foi colocado para a próxima amostragem. Se houvesse a presença de raiz, pedra, fenda entre a parede do anel e o solo, depressão do solo em relação ao tamanho do anel ou qualquer outra observação que comprometa o volume do solo correspondente às dimensões do anel, esta foi descartada e nova coleta foi realizada.

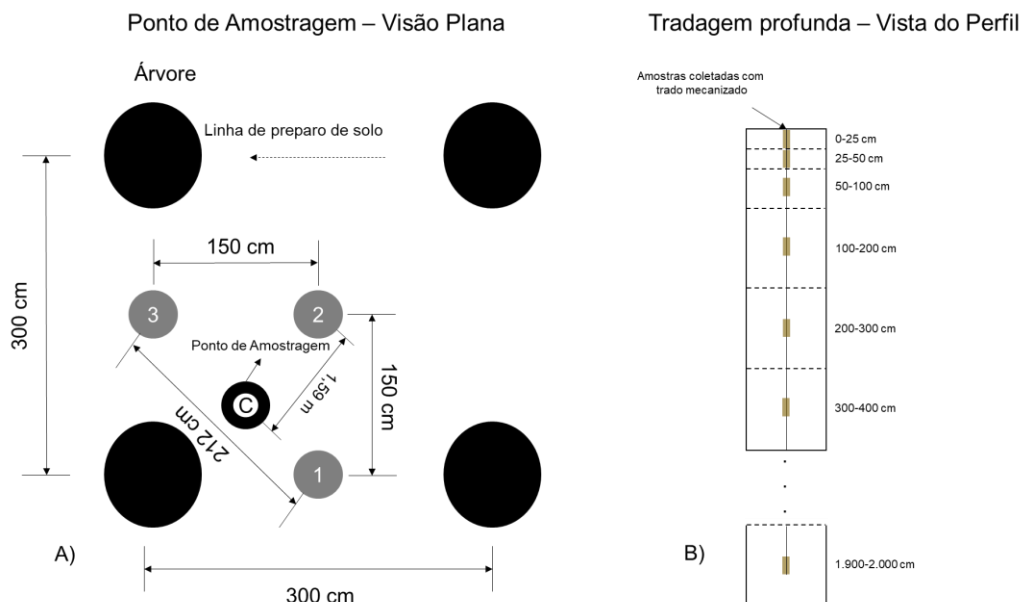
3.2.3. Metodologia de Amostragem de Raízes Finas

O sistema radicular das plantas de eucalipto foi avaliado em uma cronosequência de 3, 9, 24 e 65 meses. A amostragem foi realizada apenas no sítio 14, sendo a área escolhida ao lado do experimento TECHS. Amostras de solo foram coletadas com um trado semi-mecanizado usando uma broca de 100 mm de diâmetro. As coletas foram realizadas entre os dias 26 e 31 de maio de 2014. Este período foi selecionado porque foi o final da estação chuvosa, o que garante que as raízes estivessem em um pico de absorção de água e o solo estivesse em alta capacidade de umidade. A distribuição das raízes foi avaliada em relação à profundidade e distância do tronco, sendo amostradas em três diferentes distâncias de tronco. As amostras foram separadas por camadas de 0-25, 25-50, 50-100, 100-150 cm e assim por diante até a última raiz ser encontrada. Total de 15 pontos amostrados até a profundidade máxima das raízes, sendo escavados 2 m além de onde a última raiz foi

encontrada. Os pontos foram distribuídos em diferentes plantas dentro da parcela, cada ponto em uma posição diferente em relação ao tronco, aumentando a representatividade da amostragem (Figura 7). O ponto 1 está na linha de plantio, no meio de duas plantas, o ponto 2 no meio de duas linhas de plantio entre duas plantas paralelas e o ponto 3 no meio de duas linhas de plantio entre quatro árvores, tornando-se o ponto mais distante das plantas. Clone A1 foi selecionado para a prospecção de DRF.

Figura 7 - Esquema de amostragem do solo no campo nos quatro locais do TECHS.

A) Ponto de coleta do solo (C) localizado entre os pontos de apoio 1, 2, 3 (pontos não coletados) para evitar pontos de coleta muito próximos às plantas e também pontos distantes dos troncos. B) Perfil do solo coletado até o momento em que as raízes foram observadas, exceto o sítio 13, que interrompeu a coleta a 2.000 cm de profundidade.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Após as coletas, todo o solo foi armazenado em sacos plásticos para evitar a perda e a umidade do solo. As amostras foram levadas ao laboratório de separação de raízes em Itatinga-SP, sendo armazenadas em geladeira para evitar a decomposição das raízes. As amostras de solo foram lavadas suavemente e as raízes

finas (diâmetro < 2 mm) foram cuidadosamente separadas manualmente (CHRISTINA *et al.*, 2011). As raízes vivas e mortas foram separadas com base em critérios de cor e resistência. Enquanto as raízes vivas eram marrons e flexíveis, as raízes mortas eram negras e frágeis. Apenas raízes vivas foram estudadas, as raízes mortas foram descartadas. Uma subamostra (10% em peso de cada amostra) foi lavada em peneiras com uma malha de 300 mesh, para separar as raízes com menos de 1 cm de comprimento e o restante da amostra foi peneirado com uma malha de 500 mesh separar apenas as raízes maiores e iguais a um centímetro de comprimento. Assim, 100% das raízes maiores e iguais a 1 cm e 10% das raízes menores que 1 cm foram separadas, estimando raízes totais menores que 1 cm em toda a amostra. As raízes foram secas a 65 ° C por 72 horas para determinar sua massa seca. A umidade do solo em cada camada foi medida a partir de 20 g de solo seco a 105 ° C por 72 horas. Massas secas de raízes finas, separadas em laboratório (mais massa de raízes <1cm estimada em relação à subamostra), foram totalizadas para cada camada de solo. A biomassa da densidade de raízes finas (DRF) foi estimada a partir da determinação da densidade radicular (g kg^{-1} de solo) e da densidade aparente do solo.

3.2.4. Relação entre Densidade de Raízes e Absorção de Água

Em estudos que tratam de raízes e absorção de água, a distribuição de raízes é frequentemente descrita usando a densidade do comprimento de raiz (DCR), ou seja, o comprimento total de raiz por unidade de volume do solo (GREGORY, 2006). No caso deste estudo, determinamos o DRF e realizamos a conversão para comprimento de raiz fina (DCR) usando o modelo proposto por Witschoreck *et al.* (2003) em uma relação direta entre biomassa e comprimento de raízes finas.

A relação entre o comprimento da raiz fina (DCR) e a potencial absorção de água (AD) foi calculada pelo modelo matemático proposto por King (2003) adaptado por Ferchaud *et al.* (2015), conforme a equação abaixo:

$$AD = (a - y_0). (1 - e^{-DCR k}) + y_0$$

Em que:

AD= potencial de absorção de água (%).

a = qual é o maior AD alcançável pela cultura ($a = 100\%$ no modelo original).

y_0 = que é o AD obtido em camadas de solo de raiz livre devido a possível ascensão capilar de água ($y_0 = 0$ no modelo original).

k = é um "coeficiente de captura de recursos" que resume os detalhes da fisiologia e do solo do transporte de absorção de água. Um maior valor de k leva a um aumento mais rápido na extração de água quando a densidade da raiz aumenta.

Um valor comum para todas as idades de plantio foi escolhido para a otimização dos parâmetros para a e k foi realizada com o solver do Excel usando o método GRG não-linear. O critério minimizado foi RMSE. O valor médio de k foi de 6,94, sendo maior que o de King (2003). O mesmo autor aponta que valores de 2,0 encontram valores de k para densidade de comprimento radicular maior que 0,6 cm cm³ (DRF acima de 0,37 g dm³). O comprimento médio da raiz deste estudo foi de 0,0824 cm cm⁻³ (0,0511 g dm⁻³), o que tornou necessário ajustar os valores de k para este estudo.

A partir da equação de CAD_{1mt.}, a água disponível para plantio (AD) aos 3, 9, 24 e 65 meses de idade foi calculada de acordo com o AD calculado em função do DRF e da profundidade da camada, de acordo com a equação descrita abaixo:

$$AD (mm)_{3, 9, 24, 65 \text{ months}} = \sum_{i=1}^{i=n} CAD_{1mt.} \cdot AD(\%) * P$$

Em que:

AD (mm)_{3, 9, 24, 65 months} = água disponível para plantio aos 3, 9, 24, 65 meses de idade.

CAD (mm) = capacidade de água disponível para a camada de 1 metro de profundidade em mm.

AD (%) = potencial absorção de água em%.

P = profundidade da camada em centímetros.

3.2.5. Avaliações Dendrométricas

As medidas dendrométricas padrões deste trabalho incluem o crescimento em diâmetro a altura do peito (DAP) e altura total de planta de 80 árvores para cada parcela, medido a cada 6 meses após o primeiro ano de plantio. Foram considerados os dados dendrométricos para os clones A1, C3, K2, Q8. Cada empresa foi responsável por essas medições após o treinamento de padronização através do protocolo de medição elaborado pela equipe técnica do TECHS. Para o cálculo do volume comercial com casca (VCCC), foram utilizados modelos volumétricos baseados em equações de volume genéricas e amplamente utilizadas no Brasil calibradas para *Eucalyptus* sp. para a mesma densidade de plantio no TECHS. Todas as avaliações deste trabalho ocorreram na medição realizada nos aniversários do 6º ano de idade dos experimentos, mas a idade variou de 68 a 75 meses, com média de 72,3 meses de idade. Para padronizar a IMA na mesma idade, utilizou-se a metodologia de curva-guia, conforme a equação abaixo:

$$IMA\ 6\ anos = \frac{idade \cdot IMA\ idade \cdot 265,6 \cdot e^{-1,56-0,58 \cdot idade} \cdot 265,6 \cdot e^{-1,56-0,58 \cdot 6}}{6}$$

Em que:

IMA 6 anos: incremento médio anual aos 6 anos de idade.

IMA idade: incremento médio anual na idade do inventário realizado.

A idade de 6 anos foi escolhida por ser convencionalmente a idade de rotação do eucalipto no Brasil.

Para determinar a densidade básica da madeira (DB), (madeira + casca) de 3 cm de espessura da haste da árvore abatida nos DAP a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% (até 5 cm de diâmetro) da altura total. Ao cortar os discos, certificou-se de que a casca estava completa ao redor da madeira. Após a retirada dos discos, os mesmos foram armazenados em sacos plásticos e levados para o Laboratório de Qualidade da Madeira da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ). Para a determinação da densidade básica das amostras, foi utilizado o método de imersão em água, que consiste em saturar a amostra e determinar o volume através da flutuação (BARBOSA; BREITSCHAFT, 2006). Após a determinação do volume, os discos da madeira descascada foram secos até atingir uma massa constante em um forno a 103 ± 2 ° C. A partir da massa seca e do volume saturado, determinou-se a

densidade básica da madeira descascada dividindo-se a massa seca pelo respectivo volume saturado, seguindo a NBR 11941-02 (ABNT, 2003).

3.2.6. Análises Estatísticas (descritiva e teste de médias)

3.2.6.1. Estatísticas Descritivas

O software Excel ® 2013 foi utilizado para cálculos de estatística descritiva: média, desvio padrão, coeficiente de variação, valores mínimo e máximo. Os pontos anômalos (outliers) foram então identificados, conforme identificado no gráfico de ramos e folhas, e substituídos pelos valores médios dos vizinhos para evitar que valores extremos, que geralmente não são representativos dos tratamentos médios aplicados, afetariam a média valores produzidos pelos ecossistemas produtivos de madeira (BARBOSA *et al.*, 2012).

De acordo com a classificação do coeficiente de variação (C.V.) proposta por Pimentel-Gomes e Garcia (2002), a variabilidade de um atributo pode ser classificada de acordo com a magnitude de seu coeficiente de variação. Assim, utilizou-se o coeficiente de variação (C.V.) no qual a relação percentual entre o desvio padrão e a média, expressa de forma padronizada, o grau de dispersão da variável. Segundo Pimentel-Gomes e Garcia (2002), a magnitude do coeficiente de variação (CV) pode classificar a variabilidade de uma propriedade. As classes foram estabelecidas como baixas ($CV \leq 10\%$), médias ($10\% < CV \leq 20\%$), altas ($20\% < CV \leq 30\%$) e muito altas ($CV > 30\%$).

Diferenças entre os atributos dos solos nos horizontes A e B foram avaliadas através do teste de médias (Tukey) ao nível de 5% de probabilidade.

Correlações lineares de Pearson (R) foram realizadas para entender objetivamente as relações entre os atributos IMA e DB, DB e Clima, e CAD e AD (mm) e atributos do solo. Foram feitas correlações entre as variáveis que são pouco estudadas e tentam gerar informações relevantes sobre essas variáveis.

3.2.6.2. Redes Neurais Artificiais

O treinamento de uma rede neural artificial (RNA), também chamado de aprendizagem, consiste no ajuste dos parâmetros da rede (pesos e Bias) por meio de um algoritmo de aprendizagem. Nesse processo, os dados de treinamento (conjunto de exemplos) são apresentados a uma arquitetura pré-estabelecida, ou seja, um certo número de matrizes de neurônios em camadas. Após isso, o algoritmo de treinamento desenha características para representar as informações fornecidas e executar uma tarefa específica. As variáveis utilizadas como entrada de RNA para estimativa de CAD (mm), AD_{3 meses} (mm), AD_{24 meses} (mm), AD_{65 meses} (mm), IMA, DB pelas variáveis climáticas e edáficas foram numéricas e categóricas, e entre todas as variáveis (edáficas e climáticas).

Como possível alternativa ao método de regressão em RNA, foram utilizadas redes feedforward, treinadas através do algoritmo de retropropagação, ou seja, durante o treinamento da rede, foram realizados cálculos da camada de entrada da rede para a camada de saída e propagação do erro para as camadas anteriores. Em todo o pré-processamento, a normalização e equalização dos dados foram realizadas visando uma maior sensibilidade da rede à variação dos dados e melhor capturar seu comportamento. Os dados foram divididos em grupos de calibração (60% das amostras), validação (20%) e teste (20%), utilizando o método de amostragem aleatória.

RNA Linear, Multilayer Perceptron (MLP), Radial Basis Function (RBF) foram treinadas. Destes, dois foram selecionados com base nos desvios dos valores estimados e observados e, portanto, as melhores redes foram selecionadas para o estudo. A definição de arquitetura de rede, número de camadas e número de neurônios por camada foi otimizada pela ferramenta *Intelligent Problem Solver* (IPS) do software Statística 7.0 (STATSOFT, 2007).

Foram testadas 1000 interações de RNA, sendo as 15 melhores retidas com base nos valores do coeficiente de regressão de Pearson (R) entre os valores estimados e observados pela rede, com 10 neurônios na camada central.

3.2.6.3. Regressão Ridge

A distinção entre regressão fixa, Regressão Ridge (RR) e variável aleatória de regressão está associada ao parâmetro de penalidade λ , o qual é dado pela equação (RESENDE *et al.*, 2010):

$$\lambda = \frac{(1 - x^2)}{x^2}$$

Em que:

λ = constante lambda;

x = variância do atributo solo e clima avaliado.

Especificamente, uma constante (lambda) será adicionada à diagonal da matriz de correlação, que é então re-padronizada para que todos os elementos diagonais sejam iguais a 1.0 (e os elementos sejam divididos pela constante). Em outras palavras, a regressão de crista diminui artificialmente os coeficientes de correlação, de modo que estimativas mais estáveis (ainda tendenciosas) (coeficientes lambda) podem ser calculadas. Pequenos valores de λ já são suficientes para reduzir o impacto da multicolinearidade entre as covariáveis presentes na matriz de regressão, que é aproximadamente singular. O valor de λ igual a zero caracteriza a regressão fixa. Valores pequenos de λ (0,01 a 0,1) caracterizam a regressão da crista (RR) e altos valores λ (maiores que 0,1) caracterizam a regressão aleatória.

Usamos a Regressão de Ridge (RR) para comparar com as estimativas de CAD, AD, IMA, DB geradas por RNAs. RR é uma técnica para análise de dados de regressão múltipla que sofrem de multicolinearidade, como por exemplo, os teores de argila e areia grossa deste estudo. O fator lambda da regressão da crista utilizada foi de 10%, tolerância nas estimativas de 0,0001 e fator de significância de 5%.

A avaliação da acurácia e precisão das equações ajustadas e o resultado do treinamento das redes neurais artificiais RNA e RR foram realizadas através da raiz do quadrado médio do erro absoluto e percentual (RMSE e RMSE %), erro padrão da média absoluto (EPM_a), erro padrão da porcentagem média (EPM%), coeficiente de

correlação de Pearson entre os valores estimados e observados (LAFETÁ *et al.*, 2018). Os erros médios foram assim definidos de acordo com as equações abaixo:

$$RMSE = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(y_{obs.} - y_{est.})^2}{(n - 1)}}$$

$$RMSE\% = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(y_{obs.} - y_{est.})^2}{(n - 1)}}}{\left(\frac{y_{obs.}}{n}\right)}$$

$$EPM_a = \frac{SD}{\sqrt{n}}$$

$$EPM\% = 100 * \frac{\frac{SD}{\sqrt{n}}}{\Sigma\left(\frac{y_{obs.}}{n}\right)}$$

Em que:

RMSE = raiz do quadrado médio do erro absoluto.

RMSE % = raiz do quadrado médio do erro percentual.

EPM_a = erro padrão da média como uma porcentagem.

EPM% = erro padrão da média absoluta.

$y_{obs.}$ = valores observados das variáveis de resposta CAD, AD, IMA, DB.

y_{est} = valores estimados das variáveis de resposta CAD, AD, IMA, DB.

SD = desvio padrão da média.

n = número de observações na amostra.

Os ajustes dos modelos RR e RNA foram realizados utilizando o software Statistica 7.0 (STATSOFT, 2007).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1. Potencial de Absorção de Água

Observa-se que as raízes finas ocupam o solo rapidamente (Figura 8A), pois aos 3 meses de idade já havia raízes subsuperficiais. Nota-se que as raízes atingiram profundidades máximas de 75, 225, 775 e 1575 cm com a idade de 3, 9, 24 e 65 meses de idade, respectivamente. Uma taxa de crescimento radicular de 0,89 cm dia⁻¹ também foi observada, e a taxa de geotropismo negativa foi considerada. O DRF variou de 0,46 g dm⁻³, com média de 0,06 g dm⁻³, com os maiores valores de DRF na camada 0-12,5 e 12,5-37,5 cm. Houve uma forte tendência de redução de DRF e AD devido ao aumento da profundidade do solo, evidenciado por linhas de tendência exponenciais com altos valores de R². Esta diminuição exponencial é mais ou menos verificada para a maioria das culturas, mas não para a alfafa ou miscanto (FERCHAUD *et al.*, 2015).

Laclau *et al.* (2013) observaram alta DRF nos 3 metros superiores do solo e raízes finas e esparsas em camadas muito profundas do solo, o que possibilitou evitar a perda de água por drenagem profunda após o fechamento do dossel. Nesse mesmo sentido, Laclau *et al.* (2001a) demonstraram alta heterogeneidade na distribuição espacial de *Eucalyptus spp.* e a redução de sua densidade com o aumento da profundidade. Uma das variações observadas entre os resultados dos diferentes autores pode ser devido à profundidade efetiva do solo exercer grande efeito sobre a dinâmica sazonal das raízes de *Cryptomeria japonica*, sugerindo que as variações do perfil, como temperatura, umidade e densidade do solo, paralelamente às condições propriedades fisiológicas da planta, influenciam substancialmente a dinâmica das raízes finas desta espécie (KONÔPKA *et al.*, 2006). Gonçalves (1995) verificou que quanto maiores as taxas de crescimento das árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, menor a densidade de raízes finas nas diferentes camadas do solo. As maiores densidades dessas raízes foram encontradas em solos menos férteis, enquanto nos solos mais férteis, com maior disponibilidade de bases e menor concentração de alumínio, os autores observaram menor número de raízes. King *et al.* (2003) observaram densidades radiculares superiores às deste trabalho (0,59 g dm⁻³), provavelmente devido ao cultivo de cereais com sistemas radiculares

fasciculados, enquanto o eucalipto seminal possui um sistema radicular axial ou pivotante. Outro ponto importante para a dinâmica do conteúdo de DRF está relacionado ao tempo de coleta, ou mesmo à umidade presente nas camadas que podem estimular fortemente as raízes em seu desenvolvimento (FERCHAUD *et al.*, 2015). Outro fator apontado por Ferchaud *et al.* (2015) foi que a extensão da raiz de culturas perenes atingiu o status máximo desde que as culturas tinham 4 anos de idade, o que sugere que teríamos densidades de raízes mais altas se as amostras tivessem sido coletadas aos 4 anos de idade.

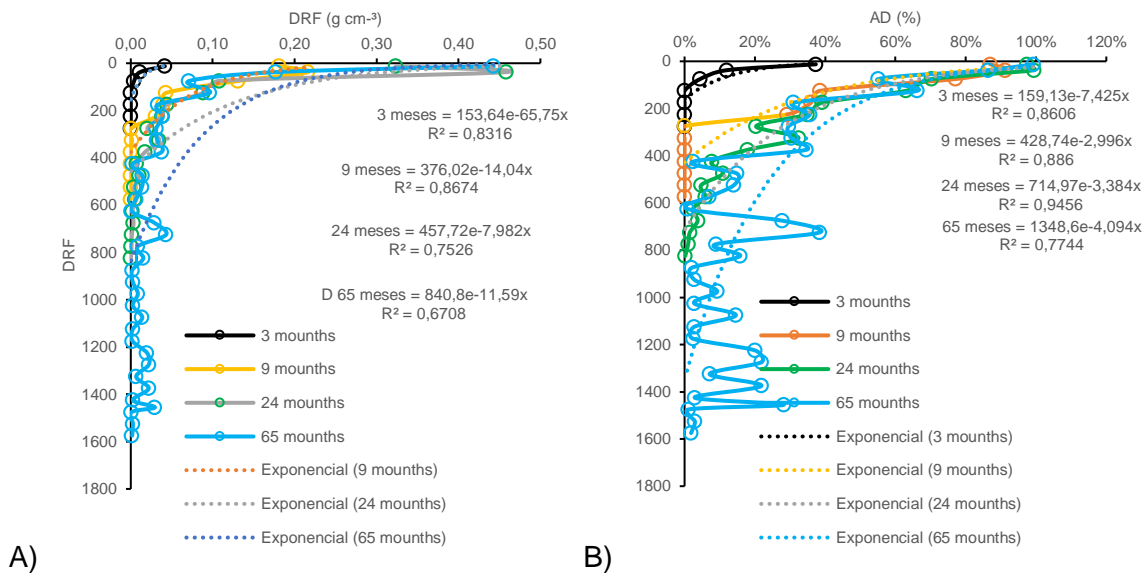
AD nas idades de 3, 9, 24, 65 meses foram, respectivamente, 17,3%, 59,8%, 28,5%, 21,8%, com uma média geral de 26% em todos os estratos. Não foram observados em nenhuma camada com 100% de AD, nem mesmo nas camadas superficiais do solo. A AD variou de 99% a 0,18% nas camadas onde as raízes de eucalipto foram identificadas. Em muitos trabalhos de cálculo do balanço hídrico, apenas água de até 1,0 a 2,0 metros de profundidade que geram a CAD do solo de 100, 200, 300 mm é considerada, muitas vezes sem referência à idade de plantio do eucalipto (SOUZA *et al.*, 2006). No entanto, a absorção em algumas camadas exige muita atenção, por exemplo, a AD observada na camada de 1455 cm de 28% com a idade de 65 meses, ou mesmo a AD na profundidade de 725 cm com 38%, o que deve ser considerado no cálculo de AD de eucalipto.

Em nenhuma camada foi observada 100% da AD, uma vez que os valores de DRF observados neste trabalho foram baixos em comparação com culturas anuais, como por exemplo, os cereais. Houve uma forte correlação linear positiva entre DRF e AD ($r = 0,87$, $p < 0,0001$). No entanto, a forma da relação (assintótica curvilínea) mostrou que as raízes com baixa densidade foram relativamente mais eficientes para recuperar a água do que as raízes mais rasas e mais densas. Este fator foi equalizado pelo fator k . Nesse sentido, o fator k médio observado neste estudo foi de 6,94 cm². Em estudos realizados por Ferchaud *et al.* (2015). Neste estudo, os valores de k de 12,6, 24,4, 39,6, 23,9, 7,3, 3,1 cm² para as culturas de Miscanthus, Switchgrass, Festuca, Alfafa, Sorgo e Triticale foram observados. No entanto, no presente estudo, King *et al.* (2003) utilizaram valores fixos de k de 2,0 cm² para culturas de cereais, argumentando que seriam valores razoáveis para culturas com DRF acima de 0,37 g dm⁻³ ou 0,60 cm cm⁻³. As diferenças observadas para valores de k , com valores mais baixos para culturas perenes de ciclos mais longos, podem ser parcialmente

explicadas pelas diferenças na evaporação do solo entre as diferentes idades das plantações de eucalipto que apresentam cobertura de dossel muito diferente. Esses modelos são muito interessantes do ponto de vista prático, pois permitem interpretar e captar valores de AD relativamente altos em camadas profundas de solos, como AD de 28% a 1455 cm de profundidade aos 65 meses de idade. Robertson *et al.* (1993) encontraram o mesmo tipo de relação entre consumo de água e DRF para o sorgo granífero com um patamar acima de um limiar de DRF. Zhang *et al.* (2004) também relataram maior absorção de água por comprimento de raiz unitária em profundidade do que perto da superfície do solo para trigo de inverno irrigado. Quando a densidade da raiz aumenta, a competição entre as raízes vizinhas é também aumentada, reduzindo sua eficiência relativa.

Pela demonstração do elevado potencial de absorção de água deste estudo, tem-se a acrescentar e ponderar que existem algumas estratégias e processos adicionais de absorção de água pelas plantações de eucalipto segundo estudos realizados por Christina *et al.* (2017): 1) o rápido crescimento das raízes após o plantio fornece acesso a grandes quantidades de água armazenadas em camadas de solo nos primeiros 2 anos. 2) raízes de eucalipto atingiram o lençol freático a uma profundidade de 12 m depois de 2 anos. Embora a retirada média de água em profundidades superiores a 10 m representou apenas 5% da transpiração do dossel do plantio até a idade de 5 anos, a proporção da captação de água perto do lençol freático foi muito mais alta durante os períodos de estiagem. 3) o lençol freático subiu de 18 para 12 m abaixo do solo durante 2 anos após a colheita do stand anterior e depois caiu até a idade de colheita, pois as taxas de evapotranspiração excederam a precipitação anual. Neste sentido, percebe-se que as raízes vivas não necessariamente permanecem ativas, em especial, no período chuvoso, que a absorção se restringiu as camadas superficiais, e as raízes profundas, principalmente as próximas ao lençol freático, tornam-se ativas no período seco, o que permite as altas taxas de transpiração ao longo de todo o ano.

Figura 8 - A) distribuição em profundidade da densidade de raízes finas (DRF) aos 3, 9, 24, 65 meses de idade das plantações do clone A1 no estado de Mato Grosso do Sul, Brasil; B) distribuição profunda do potencial de absorção de água (AD %) aos 3, 9, 24, 65 meses de idade das plantações clone A1 no estado do Mato Grosso do Sul, Brasil.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.3.2. Potencial de absorção de água e suas relações com a água disponível para plantações de eucalipto

O IMA apresentou um alto coeficiente de variação (35%), sendo o contraste entre os locais menos e mais produtivos muito alto (por exemplo, local com menor produtividade o sítio 29 com produtividade de $13,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, por exemplo, local com maior produtividade 22 com produtividade máxima de $67,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) (Tabela 4). Isso é demonstrado analisando e interpretando o coeficiente de curtose de 0,21, onde podemos dizer que a função de distribuição é leptocúrtica e tem a curva da função de distribuição reduzida a um pico mais alto. Neste caso, dizemos que esta distribuição tem caudas pesadas, isto é, eles têm extremos muito diferentes. Isso torna este trabalho muito interessante e relevante, uma vez que temos alta variabilidade e

contraste entre os locais, e os modelos e extrapolações com dados de experimentos dessa natureza geralmente representam a população como um todo.

Em 2016, o Brasil liderou o ranking mundial de produtividade florestal, com média de $35,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para os plantios de eucalipto, de acordo com informações reportadas pelas principais empresas do setor (IBÁ, 2017). O IMA observado neste estudo foi 15,7% superior à média nacional. Stape *et al.* (2010) relataram que a produtividade demonstrada nos experimentos está mais próxima da produtividade atingível do local devido aos cuidados adicionais tomados nos experimentos e geralmente os experimentos ocorrem em pequenas áreas, enquanto a produtividade observada em áreas operacionais ou comerciais é interferida por ervas daninhas afetam a competição, as pragas, doenças que são penalizadores da produtividade atingível. Por outro lado, a produtividade média deste trabalho está de acordo com a média nacional dos trabalhos realizadas por diversos autores no Brasil (CORRÊA *et al.*, 2015, SOUZA *et al.*, 2017), em condições experimentais.

Foi realizada correlação linear de Pearson entre IMA e DB e observamos uma correlação não significativa ($R = -0,17$, $p = 0,078$). O DB apresentou um baixo coeficiente de variação. O local com os menores valores de DB foi o sítio 29, com o IMA entre os clones $15,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, e o local com os maiores valores de DB foi o local 20, com IMA de $38,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Os coeficientes de variação foram considerados baixos, o que também pode ser justificado pelo coeficiente de curtose negativo. Neste caso, se o coeficiente de curtose for negativo, a função de distribuição é mais plana ou a distribuição é platicúrtica. Em resumo, as relações entre IMA e DB podem ser consideradas características de cada espécie e material genético, mas a variação do crescimento responde em maior proporção do que a variação na densidade (ROCHA, 2017). As menores taxas fotossintéticas limitam o crescimento e investem em custos mais altos de carbono na parede celular e vasos com diâmetros menores e, assim, algumas vezes inferem correlações negativas entre o crescimento e a densidade básica da madeira (POORTER *et al.*, 2009). No caso deste estudo, as correlações não foram significativas, no entanto, uma tendência de correlação negativa foi observada entre IMA e DB.

Nós correlacionamos DB com todos os atributos climáticos avaliados neste trabalho e correlações significativas foram observadas apenas no DEF ($R = -0,25$, $p = 0,017$). Esperava-se que a maior densidade básica da madeira estivesse ligada ao

menor crescimento de locais com baixos déficit hídrico, mas o comportamento era o inverso do de um material genético nativo a ambientes secos e tolerante ao déficit hídrico. Esse comportamento seria esperado para o clone C3 (Tabela 4) que foi selecionado em clima tropical seco, mas o inverso ocorreu. É considerado aqui que, quando as plantações foram submetidas a altas DEF, o suprimento de carbono provavelmente diminuiu substancialmente devido à baixa condução estomática e suprimento de água, e reduziu a fotossíntese, crescimento e, conseqüentemente, a densidade da madeira (SANTIAGO *et al.*, 2004, ROCHA, 2017). Além disso, locais com menor disponibilidade de água, como o sítio 29, caracterizados como secos, induzem a formação de vasos condutores com diâmetros menores, a fim de maximizar a condutividade hidráulica (ROCHA, 2017).

Não foram observadas diferenças significativas entre os horizontes (A e B) com nível de significância de 10%. Vale ressaltar que apenas os atributos físicos dos solos foram avaliados e, nesse sentido, seriam esperados fortes contrastes de níveis profundos de atributos químicos do solo (RAMOS *et al.*, 2018). Observou-se que o solo da área de mata nativa apresenta o maior estoque de carbono em profundidade, seguido de reflorestamento e cultivo de cana-de-açúcar, não havendo diferenças significativas entre os atributos areia e silte entre as fitofisionomias, porém diferenças significativas entre os atributos dos solos DS e PT (FREITAS *et al.*, 2018). Outro fator importante que pode não ter impacto sobre os atributos físicos dos solos profundos é o fato da amostragem ter ocorrido na idade adulta (5,0 a 5,5 anos de idade) e o sistema radicular geralmente homogêneo o perfil dos solos em termos físicos, antes da ciclagem de nutrientes das plantações de eucalipto. Os povoamentos de eucaliptos apresentaram idade avançada de ciclos até 45 anos de plantios florestais, com média de 19,14 anos de AOS. Além disso, pode-se considerar também que a redução da produtividade dos plantios pela compactação do solo promovida pelo tráfego de máquinas de colheita florestal (por exemplo, *forwarder*) é atenuada com a permanência dos resíduos da colheita, principalmente com a manutenção da casca das árvores na área (JESUS *et al.*, 2015). A manutenção de resíduos florestais é quase uma regra geral entre as empresas florestais brasileiras, o que torna os sistemas florestais extremamente conservadores em termos de física do solo.

Uma grande variação nos valores de CAD (mm) e AD foi observada com um coeficiente de variação de 43%. O site 7 apresentou os menores valores de CAD _{1mt}.

(mm), local 29 com os maiores valores de CAD_{1mt.} (mm). Neste sentido, CAD_{1mt.}, AD_{3 m} (mm), AD_{9 m} (mm), AD_{24 m} (mm), AD_{65 m} (mm) com todos os atributos do solo foram correlacionados significativamente AG (R = -0,22, p = 0,032), AF (R = -0,31, p = 0,003), AT (R = -0,30, p = 0,004), SLT, R = 0,50, p = 0,001), ARG (R = 0,23, p = 0,031). Nesse sentido, observa-se que o silte é o atributo do solo que tem maior correlação com as capacidades de água disponíveis nos solos. O local 29 apresenta o maior DS entre os locais avaliados (1,61 g cm⁻³), o que contribui para aumentar a disponibilidade hídrica do solo, embora a correlação com esse atributo não tenha sido significativa (R = 0,08, p = 0,477). Por outro lado, o local 7 apresentou baixo conteúdo de SLT (0,020 kg kg⁻¹), mas o local 9 apresentou o menor valor de SLT (0,01 kg kg⁻¹).

Isso mostra que os relacionamentos não são tão diretos e simples, e que são necessárias técnicas estatísticas mais robustas para explicar ou modelar as relações entre os atributos do solo e a disponibilidade de água no solo. Os valores de água disponíveis no solo não são frequentemente apresentados na literatura considerando a profundidade efetiva do sistema radicular e sua correlação com a idade do eucalipto (CHRISTINA *et al.*, 2017). Por exemplo, Binkley *et al.* (2017) relataram que a capacidade de retenção de eucalipto no Brasil e no Uruguai (0-2 m de profundidade) diferiu em até quatro vezes em todos os locais, aumentando de 75 mm m⁻¹ para 10% de argila para mais de 200 mm m⁻¹ para solos com 80% de argila, independentemente da idade e distribuição das raízes. Almeida e Sands (2015) relataram AD (mm) variando de 28 a 303 mm calculado por um modelo de determinação da capacidade de água no solo na idade rotacional do eucalipto (variando de 7 a 12 anos por rotação). Scardua (2014) relatou AD (mm) de 187 mm para plantios jovens de eucalipto na região de Aracruz, no estado do Espírito Santo, sem considerar a eficiência de absorção das raízes. Neste sentido, valores muito baixos para AD, como por exemplo, site 7 com AD 3 meses (mm) de 5,32 mm, e também foram observados valores muito altos para AD (por exemplo, site 29 com AD 65 meses (mm) de 725,72 mm).

A AD (mm) aos 24 e 65 meses observados neste trabalho foram superiores aos observados na literatura, indicando maior importância ou contribuição de raízes profundas na absorção de água do eucalipto na idade adulta. Por outro lado, valores da AD aos 3 e 9 meses observados neste estudo foram inferiores aos observados na literatura, indicando que as raízes e a profundidade do solo estão provavelmente sendo subestimadas para os cálculos da AD nas idades mais jovens do eucalipto,

sendo percebido que são necessários mais modelos sistêmicos que considerem e padronizem a metodologia de cálculo de acordo com a idade e profundidade da raiz.

Durante o período do experimento, a geada foi observada no local mais frio com mais de 8 dias de geada (por exemplo, local 23), enquanto em outros locais com temperatura máxima diária acima de 35 ° C, foi observada em 40 ou mais dias (por exemplo, site 29). Precipitação média anual variou de cerca de 877,9 mm ano⁻¹ (por exemplo, local 29) a 1525,2 mm ano⁻¹ (por exemplo, local 23), e ETP variou de cerca de 481,5 a 1491,7 mm ano⁻¹ (1,31 mm dia⁻¹ a 4,08 mm dia⁻¹). Em termos comparativos, estima-se que a evapotranspiração média anual em regiões temperadas frias húmidas e sub-húmidas seja de 1,5 mm dia⁻¹ (por exemplo, local 23), atingindo 7,5 mm dia⁻¹ em regiões de climas quentes e desertos (acima de 30 ° C) (COSTA *et al.*, 2015). Percebe-se que a grande maioria dos sites está localizada entre regiões de evapotranspiração média.

Contabilizando a capacidade de retenção de água no solo em cada local (CAD), o déficit hídrico anual (DEF) (balanço hídrico de THORNTHWAITE; MATHER, 1957) variou de 5,4 mm ano⁻¹ a locais mais frios e úmidos com mais de 800 mm ano⁻¹ no lugares mais quentes e secos.

Tabela 4 - Estatística descritiva dos atributos dendrométricos, de solo e climáticos em função de médias, medianas, valores mínimos e máximos, desvio padrão, coeficientes de variação, curtose, assimetria e teste de normalidade com classes de p-valor e normalidade para os sítios do TECHS no Brasil.

Medidas de Estatísticas Descritivas											
Atributo	Horizonte do Solo	Média	Mediana	Valor		DP	Coeficiente			Teste Normalidade	
				Mínimo	Máximo		Variação	Curtose	Assimetria	p-valor	Classe
<i>Atributos Dendrométricos</i>											
IMA	-	41,3	38,3	13,7	67,2	14,6	35%	0,21	0,32	0,77	NO
DB	-	0,4426	0,4367	0,4175	0,4775	0,0188	4%	-0,50	0,78	0,88	NO
<i>Atributos de Solos</i>											
AG	A	0,27a	0,31	0,04	0,56	0,19	71%	-1,44	0,06	0,19	NO
	B	0,24a	0,26	0,03	0,51	0,17	73%	-1,35	0,19	0,28	NO
AF	A	0,25a	0,23	0,03	0,55	0,15	60%	-0,14	0,48	0,70	NO
	B	0,24a	0,21	0,03	0,53	0,15	61%	-0,45	0,45	0,79	NO
AT	A	0,51a	0,45	0,10	0,89	0,30	58%	-1,70	-0,01	0,77	NO
	B	0,48a	0,38	0,08	0,86	0,28	60%	-1,70	0,11	0,89	NO
SLT	A	0,07a	0,04	0,01	0,21	0,06	90%	0,95	1,41	0,95	NO
	B	0,07a	0,04	0,01	0,20	0,06	89%	0,11	1,10	0,94	NO
ARG	A	0,42a	0,50	0,08	0,83	0,26	62%	-1,47	0,02	0,12	NO
	B	0,46a	0,56	0,12	0,83	0,25	54%	-1,62	-0,13	0,06	NO
DP	A	2,63a	2,64	2,47	2,74	0,08	3%	-0,80	-0,37	0,37	NO
	B	2,61a	2,60	2,49	2,79	0,09	3%	-0,54	0,54	0,75	NO
DS	A	1,30a	1,27	0,93	1,62	0,21	16%	-0,81	-0,08	0,69	NO
	B	1,25a	1,22	0,91	1,60	0,25	20%	-1,57	0,10	0,68	NO
PT	A	0,51a	0,52	0,39	0,62	0,07	14%	-0,69	0,00	0,18	NO
	B	0,52a	0,54	0,40	0,65	0,09	17%	-1,42	-0,09	0,20	NO
AOS	-	19,14	18,00	0,00	45,00	16,49	86%	-1,43	0,22	0,60	NO
CAD (mm)	-	121,41	115,17	57,06	242,37	52,33	43%	0,68	0,93	0,67	NO
AD 3 months (mm)	-	11,34	10,76	5,32	22,63	4,89	43%	0,68	0,93	0,67	NO
AD 9 months (mm)	-	138,91	131,78	65,21	277,32	59,88	43%	0,68	0,93	0,67	NO
AD 24 months (mm)	-	226,17	214,57	106,18	451,54	97,50	43%	0,68	0,93	0,67	NO
AD 65 months (mm)	-	363,51	344,86	170,65	725,72	156,70	43%	0,68	0,93	0,67	NO
<i>Atributos de Clima</i>											
Tm °C	-	21,7	22,1	17,1	27,5	2,8	13%	0,26	0,06	0,30	NO
P (mm)	-	1220,3	1225,6	877,9	1525,2	188,2	15%	-0,81	-0,13	0,46	NO
ETP (mm)	-	895,5	925,1	481,5	1491,7	272,3	30%	0,40	0,41	0,34	NO
P - ETP	-	324,8	275,4	-613,7	1043,7	431,2	133%	0,69	-0,29	0,67	NO
ARM	-	1214,5	1174,4	257,3	2481,0	787,0	65%	-1,47	0,26	0,58	NO
DEF	-	164,7	100,5	5,4	835,5	216,6	132%	7,59	2,55	0,87	NO
EXC	-	495,9	415,5	110,1	1049,2	274,6	55%	-0,23	0,75	0,86	NO

DP = desvio padrão, IMA = incremento médio anual ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$), DB = densidade básica da madeira (g cm^{-3}), AG = teor de areia grossa (kg kg^{-1}), AF = teor de areia fina (kg kg^{-1}), AT = teor total de areia (kg kg^{-1}), SLT = teor de silte (kg kg^{-1}), ARG = teor de argila (kg kg^{-1}), DP = densidade de partícula (g cm^{-3}), DS = densidade do solo (g cm^{-3}), PT = porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), AOS = anos de ocupação do solo (anos), CAD (mm) = Capacidade Disponível de Água (mm m^{-1}), AD 3 meses (mm) = Potencial Absorção de Água para plantios de 3 meses, AD 9 meses (mm) = Potencial Absorção de Água para plantios de 9 meses de idade, AD 24 meses (mm) = Potencial Absorção de Água para plantios de 24 meses, AD 65 meses (mm) = Potencial Absorção de Água para plantios de 65 meses, T_m °C = temperatura média anual em °C, P (mm) = precipitação média anual em mm, ETP (mm) = evapotranspiração potencial média anual calculada pelo método de Thornthwaite e Matter (1957) usando a capacidade de armazenamento da água no solo, P - ETP = diferença entre a precipitação e evapotranspiração potencial do local, ARM = armazenamento de água no solo em mm, DEF = déficit hídrico do solo em mm, EXC = excedente de água no solo em mm, NO = distribuição normal de dados. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade. As análises de solos foram realizadas em amostras indeformadas.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.3.3. Comparação entre estimativas de RNA e RR

As tabelas 5 e 6 mostram a superioridade das estimativas de RNA em comparação com RR. Essas comparações podem ser visualizadas pelos baixos valores de RMSE, RMSE%, EPM_a , $EPM\%$ e R alto para as regressões realizadas com os RNAs em comparação aos RRs. Um exemplo, a rede treinada com CAD (Todos) apresentaram 2,1644, 1,82%, -4,38801, -3,68% para RMSE, RMSE%, EPM_a , $EPM\%$, enquanto as mesmas variáveis treinaram com RR apresentou 2,942, 7,48%, 10,733, 9,00% para RMSE, RMSE%, EPM_a , $EPM\%$, respectivamente. Em média, observamos superioridades de 18%, 28%, 106%, 107%, 16% em termos de regressões de RMSE, RMSE%, EPM_a , $EPM\%$, R de RNA realizadas com RR. As estimativas com as variáveis climáticas mostraram menor acurácia em relação às variáveis do solo e Todas nas regressões com os RNAs devido ao fato de que para cada sítio existe apenas uma informação climática (uma estação meteorológica para cada local), enquanto para o grupo de variáveis de Solo, informações existem três para cada horizonte de solo para cada local (coletas feitas no horizonte A e B), ou seja, o número de amostras de atributos do solo é muito superior ao dos Clima, e o método de ajuste do RNA observou maior número de amostras. No entanto, para as regressões realizadas com o RR, o mesmo padrão de acurácia foi observado quando Todas as variáveis de resposta foram utilizadas, mas a mesma tendência não foi observada entre o grupo de variáveis Solo e Clima nos estimadores da acurácia das estimativas. Por exemplo, o coeficiente R para a variável independente do solo foi de 0,78,

enquanto para a variável climática independente foi de 0,80. Isso mostra que os métodos de regressão de RNA e RR são bastante distintos no processamento de dados.

Teoricamente, as variáveis climáticas são muito mais importantes do que os solos quando os dois fatores edafoclimáticos são avaliados separadamente nas estimativas de IMA e DB (STAPE *et al.*, 2010). No entanto, para as estimativas de variáveis do solo, CAD (mm) e AD (mm), espera-se que as variáveis do solo sejam muito mais importantes e as estimativas apresentem mais acurácia em relação as mesmas, mesmo embora o clima participe diretamente dos processos de formação do solo. Nesse sentido, as estimativas de RNA são muito sensíveis a grandes quantidades de dados, enquanto as regressões com RR são mais sensíveis aos processos físicos e biológicos envolvidos nas regressões. Em suma, a regressão de RNA não visa elevar os parâmetros físicos do sistema, mas fornece um modelo / equação que descreve seu comportamento (LAFETÁ *et al.*, 2018), enquanto que as regressões RR visam pesquisas de revestimentos físicos e biológicos do sistema.

Pode ser visto na Tabela 5 que os ajustes foram realizados com as equações MLP, Linear e RBF, mas o tipo de equação MLP permitiu os melhores ajustes em 81% das equações. O número de variáveis de entrada no RNA variou de 1 (por exemplo, estimativa de RBF da estimativa de IMA no clima) para 19 (por exemplo, rede linear de estimativa de IMA em todas as variáveis). O número de neurônios na camada intermediária variou de 3 (por exemplo, rede MLP de estimativa de AD de 65 meses (mm) através das variáveis do solo) para 8 (por exemplo, rede MLP de estimativa de DA de 65 meses (mm)). O RMSE observado durante o treinamento, seleção e teste das redes apresentou um gradiente de diminuição do RMSE entre a fase de treinamento e a de teste de rede, o que era esperado para redes não adictas.

Isto implica que eles não apresentaram uma memorização excessiva dos dados de treinamento, porque as redes com menor número de neurônios na camada intermediária não foram selecionadas e uma normalização dos dados, como heurística, foi aplicada. Esta normalização é uma característica muito utilizada no processamento estatístico com RNA visando uma aproximação da solução ideal dos problemas minimizando os erros (STATSOFT, 2007).

Tabela 5 - Características e acurácia das redes neurais artificiais ajustadas (RNA) para as variáveis capacidade de água disponível (CAD), absorção de água (AD), incremento médio anual (IMA), densidade básica da madeira (DB) ajustadas em função das variáveis independentes e variáveis solo-climáticas nos sítios do TECHS no Brasil.

Variável Resposta	Grupo de Variáveis Independentes	Tipo de Equação	Composição da RNA	RMSE das redes neurais			Avaliação estatística da rede				
				Treinamento	Seleção	Teste	RMSE	RMSE%	EPM _a	EPM%	R
CAD (mm)	Todas	MLP	7:7-7-1:1	0,0449	0,12947	0,119	2,1644	1,82%	-4,38801	-3,68%	0,94
	Solos	MLP	9:9-5-1:1	0,0891	0,08438	0,133	2,6593	2,23%	-2,52674	-2,12%	0,90
	Clima	Linear	9:9-1:1	0,1325	0,13325	0,108	3,5772	3,00%	1,82491	1,53%	0,81
AD 3 months (mm)	Todas	MLP	8:8-7-1:1	0,06	0,06682	0,058	0,1895	1,70%	0,10342	0,93%	0,94
	Solos	MLP	9:9-7-1:1	0,0614	0,06538	0,086	0,2267	2,04%	0,21413	1,92%	0,92
	Clima	MLP	6:6-4-1:1	0,1148	0,11329	0,226	0,3457	3,10%	0,08267	0,74%	0,80
AD 9 months (mm)	Todas	MLP	10:10-5-1:1	0,0655	0,06987	0,094	2,5799	1,89%	0,99338	0,73%	0,93
	Solos	MLP	5:5-7-1:1	0,0775	0,08927	0,17	5,6015	4,11%	-5,11012	-3,75%	0,91
	Clima	MLP	7:7-6-1:1	0,122	0,09999	0,081	3,8397	2,81%	5,60331	4,11%	0,84
AD 24 months (mm)	Todas	MLP	16:16-6-1:1	0,0527	0,11884	0,118	3,6958	1,66%	-5,84496	-2,63%	0,95
	Solos	MLP	9:9-6-1:1	0,0606	0,04597	0,101	4,5923	2,07%	0,58162	0,26%	0,93
	Clima	MLP	8:8-6-1:1	0,0854	0,08603	0,107	5,9751	2,69%	-1,73282	-0,78%	0,85
AD 65 months (mm)	Todas	MLP	6:6-5-1:1	0,0534	0,06291	0,083	6,6808	1,87%	-3,37275	-0,94%	0,93
	Solos	MLP	5:5-3-1:1	0,0487	0,06484	0,094	6,9835	1,96%	-0,54270	-0,15%	0,92
	Clima	MLP	11:11-8-1:1	0,0552	0,09163	0,089	#####	2,85%	5,21294	1,46%	0,83
IMA	Todas	Linear	19:19-1:1	0,0619	0,08228	0,084	0,4165	1,00%	-2,05982	-4,96%	0,97
	Solos	MLP	5:5-6-1:1	0,0783	0,09525	0,146	0,5864	1,41%	0,35836	0,86%	0,92
	Clima	RBF	1:1-5-1:1	0,0385	0,05502	0,052	1,0770	2,59%	-1,58313	-3,81%	0,70
DB	Todas	MLP	5:5-7-1:1	0,0221	0,02343	0,029	0,0002	0,04%	-0,00007	-0,02%	0,99
	Solos	MLP	9:9-9-1:1	0,0229	0,06654	0,045	0,0003	0,08%	-0,00016	-0,04%	0,98
	Clima	Linear	8:8-1:1	0,1565	0,18144	0,171	0,0011	0,24%	-0,00314	-0,71%	0,85

CAD (mm) = Capacidade Disponível de Água (mm m⁻¹), AD 3 meses (mm) = Potencial Absorção de Água para plantios de 3 meses, AD 9 meses (mm) = Potencial Absorção de Água para plantios de 9 meses de idade AD 24 meses (mm) = Absorção de água potencial para plantios de 24 meses, AD 65 meses (mm) = Absorção de água potencial para plantios de 65 meses, IMA = Incremento Anual Médio (m³ ha⁻¹ ano⁻¹), DB = Densidade Básica da Madeira (g cm⁻³), Todas = Todas as variáveis climáticas e do solo, Solo = variáveis do solo utilizadas neste estudo, Clima = variáveis climáticas usadas neste estudo, RMSE = raiz do erro quadrático médio, EPM_a = erro padrão da média absoluta,

EPM% = erro padrão da média em percentual, R = coeficiente de correlação linear de Pearson entre os valores estimados e observados.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 6 - Precisão da regressão ridge (RR) para a capacidade de água disponível (CAD), potencial de absorção de água (AD), incremento médio anual (IMA), densidade básica da madeira (DB) nos sítios do TECHS no Brasil.

Variável Resposta	Grupo de Variável independente	RMSE	RMSE%	EPM _a	EPM%	R
CAD (mm)	Todas	2,942	7,48%	10,733	9,00%	0,88
	Solos	3,873	1,84%	10,674	8,95%	0,78
	Clima	3,798	3,18%	8,441	8,47%	0,80
AD 3 months (mm)	Todas	0,275	2,47%	1,002	9,00%	0,88
	Solos	0,362	3,25%	0,997	8,95%	0,78
	Clima	0,355	3,19%	0,843	7,57%	0,80
AD 9 months (mm)	Todas	3,366	2,47%	12,282	9,00%	0,88
	Solos	0,362	3,25%	0,997	8,95%	0,78
	Clima	4,346	3,19%	10,326	7,57%	0,80
AD 24 months (mm)	Todas	5,481	2,47%	19,997	9,00%	0,88
	Solos	7,225	3,25%	19,887	8,95%	0,78
	Clima	7,076	3,19%	16,812	7,57%	0,80
AD 65 months (mm)	Todas	8,809	2,47%	32,140	9,00%	0,88
	Solos	11,612	3,25%	31,962	8,95%	0,78
	Clima	11,372	3,19%	27,021	7,57%	0,80
IMA	Todas	0,900	2,17%	3,034	7,31%	0,79
	Solos	1,299	3,13%	3,320	8,00%	0,47
	Clima	1,066	2,57%	2,280	5,49%	0,69
DB	Todas	0,001	0,29%	0,004	0,97%	0,74
	Solos	0,001	0,33%	0,004	0,86%	0,63
	Clima	0,002	0,35%	0,003	0,77%	0,60

CAD (mm) = Capacidade Disponível de Água (mm m⁻¹), AD 3 meses (mm) = Potencial Absorção de Água para plantios de 3 meses, AD 9 meses (mm) = Potencial Absorção de Água para plantios de 9 meses de idade AD 24 meses (mm) = Absorção de água potencial para plantios de 24 meses, AD 65 meses (mm) = Absorção de água potencial para plantios de 65 meses, IMA = Incremento Anual Médio (m³ ha⁻¹ ano⁻¹), DB = Densidade Básica da Madeira (g cm⁻³), Todas = Todas as variáveis climáticas e do solo, Solo = variáveis do solo utilizadas neste estudo, Clima = variáveis climáticas usadas neste

estudo, RMSE = raiz do erro quadrático médio, EPM_a = erro padrão da média absoluta, $EPM_{\%}$ = erro padrão da média em percentual, R = coeficiente de correlação linear de Pearson entre os valores estimados e observados.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.4 CONCLUSÕES

Os valores de AD aos 24 e 65 meses observados neste estudo foram superiores aos observados na literatura, indicando maior importância ou contribuição das raízes profundas na absorção de água do eucalipto na fase adulta. Por outro lado, os valores de AD aos 3 e 9 meses observados neste estudo foram menores que os observados na literatura, indicando que as raízes e a profundidade do solo são provavelmente subestimadas para os cálculos de AD nas idades mais jovens de eucalipto. Percebe-se que são necessários mais modelos sistêmicos que considerem e padronizem a AD de acordo com a idade e profundidade da raiz.

O IMA apresentou correlação não significativa com o DB, uma vez que os clones utilizados neste estudo mostraram homogeneidade no DB. Observamos correlações negativas entre DB e DEF, o que é justificado pelo baixo crescimento, redução no acúmulo de carbono e redução do tamanho das plantações de eucalipto em locais secos.

As estimativas de CAD, AD's, IMA, DB realizadas com RNA foram mais precisas do que aquelas com RR.

4 PADRÕES E DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO ATÉ 20 M DE PROFUNDIDADE EM PLANTAÇÕES CLONAIS DO *EUCALIPTO UROPHYLLA* NO BRASIL

RESUMO

O Brasil possui uma das maiores áreas plantadas e maior produtividade no mundo das plantações de eucalipto. Isso requer muita atenção em aspectos relacionados ao uso de água e nutrientes nessas plantações. Nos ecossistemas tropicais, a limitação do fator de crescimento de plantas é frequentemente a disponibilidade de nutrientes no solo. O objetivo do presente trabalho foi caracterizar os Atributos e Distribuições Verticais de Atributos do Solo até 20 m de profundidade em Plantios Clonais de *Eucalyptus urophylla* no Brasil, e também gerar equações para obter estimativas dos atributos do solo das camadas profundas. Neste estudo, foram avaliados 4 locais: Três Lagoas - MS (Sítio 13), Mogi Guaçu - SP (Sítio 20), Telêmaco Borba - PR (Sítio 22), Bocaiuva - MG (Sítio 30). O perfil do solo foi dividido em camadas (0-25, 25-50, 50-100, 100-200 cm e a cada 100 cm até a profundidade máxima das raízes finas). Os seguintes atributos do solo foram avaliados nas camadas profundas: fósforo (P), potássio (K); cálcio (Ca); boro (B), cobre (Cu); zinco (Zn), teor de matéria orgânica (M.O.); capacidade de troca catiônica (CTC), sulfato (S - SO₄) e granulometria de argila (ARG), silte (SLT) e areia total (AT). Os modelos foram ajustados de acordo com cada atributo do solo e em cada local. Neste sentido, os modelos 1 (modelos locais para cada local) e modelo 2 (modelo global para todo o conjunto de dados) foram propostos usando o SIGMAPLOT 6®. Uma análise de variância (ANOVA) entre os atributos dos solos dos sítios e das profundidades foi realizada com as médias de Scott-Knott a um nível de significância de 5%. Além disso, análises de componentes principais foram realizadas para identificar as principais variáveis na distribuição vertical dos atributos do solo. Há um forte contraste entre os atributos do topo do solo (TS) e o solo das camadas profundas (SS), exceto silte e sulfato, que em média, não mostraram diferenças significativas entre o topo e o subsolo (teste de Scott-Knott, $p < 0,05$). No caso da fração AT, o comportamento foi o oposto, o topo do solo apresentou menor teor de areia em relação ao subsolo. A profundidade total do sistema radicular (PTSR) variou de 8 a 20 m, e em alguns locais a limitação foi devido às raízes atingirem a rocha. Outro ponto interessante foi que as amostras de solo recomendadas nos principais boletins agrícolas brasileiros são relativamente superficiais, considerando que o sistema radicular do eucalipto atinge profundidades de até 20 metros de profundidade. Considerando amostras de solo convencionais (0-40 cm), elas representam apenas 2%, 5%, 4%, 2%, locais 13, 20, 22, 30, respectivamente, com uma média de 3,25% de todo o estoque de nutrientes no perfil do solo das plantações de eucalipto. Pode-se verificar que com o aumento do número de rotações e anos de ocupação dos solos com os plantios florestais, ocorre a hipótese do “aumento de nutrientes (P, K, B)”. Por outro lado, com o aumento da profundidade do sistema radicular constatou uma redução do estoque de nutrientes na superfície dos solos.

Palavras-chave: Nutrientes do solo superficial. Nutrientes do subsolo. Eucalipto. Floresta. Ferralsol. Árvore tropical.

ABSTRACT

Brazil has one of the largest planted areas and highest yields in the world of eucalyptus plantations. This requires a lot of attention on aspects related to the use of water and nutrients in these plantations. In tropical ecosystems, the plant growth factor limitation is often the availability of soil nutrients. The root system is thus a large compartment that can be particularly affected by the physical and chemical limitations of the soil. The TECHS (Tolerance of Clonal Eucalyptus to Water and Thermal Stresses) project was designed to understand the main environmental stresses affecting productivity and the response to drought of eucalyptus in tropical and subtropical climate conditions. However, there are still incipient studies of the TECHS platform that address the influence of soil on productivity, response to drought of eucalyptus, as well as on the contribution of soils of the deep layers in the potential supply of nutrients. The objective of the present work was to characterize the Vertical Attributes and Distributions of Soil Attributes up to 20 m depth in Clonal Plantings of *Eucalyptus urophylla* in Brazil, and also to generate models to obtain estimates of the soil attributes of the deep layers. In this study, 4 sites were evaluated: Três Lagoas - MS (Site 13), Mogi Guaçu - SP (Site 20), Telemaco Borba - PR (Site 22), Bocaiuva - MG (Site 30). Sites 20, 22, and 30 were referred to in the protocols as "special sites" that had strong edaphoclimatic contrasts for the further study of TECHS. The soil profile was divided into layers (0-25, 25-50, 50-100, 100-200 cm and every 100 cm to the maximum depth of fine roots) whose samples were collected and conditioned in plastic bags, in order not to occur loss of moisture. The following soil attributes were evaluated in the deep layers: phosphorus (P), potassium (K); calcium (Ca); boron (B), copper (Cu); zinc (Zn), organic matter contents (O.M.); cation exchange capacity (CEC), sulfate (S - SO₄), and clay, silt (SLT) and total sand (TTS) granulometry. Models were adjusted according to each soil attribute and in each site. In this sense, models 1 (local models for each site) and model 2 (global model for the entire data set) were installed using SIGMAPLOT 6 ®. An analysis of variance (ANOVA) between the soil attributes of the sites and the depths was carried out with the Scott-Knott averages at a significance level of 5%. In addition, major component analyzes were performed to identify key variables in the vertical distribution of soil attributes. It is clear that there is a strong contrast between soil and soil attributes, except for silt and sulfate, which on average did not show significant differences between the top and the subsoil (Scott-Knott test, $p < 0.05$). In the case of the total sand fraction, the behavior was the opposite, the top presented lower sand content in relation to the subsoil. The root depth system (RDT) varied from 8 to 20 m, and in some sites the limitation was due to the roots reaching the rock. Another interesting point that was noticed was that the soil samples recommended in the main Brazilian agriculture bulletins are relatively superficial, considering that the eucalyptus root system reaches depths of up to 20 meters. Considering conventional soil samples (0-40 cm), they represent only 2%, 5%, 4%, 2%, sites 13, 20, 22, 30, respectively, with a mean of 3.25% of the entire nutrient stock in the soil profile of eucalyptus plantations. It can be verified that with the increase of the number of rotations and years of occupation of the soils with the forest plantations, the hypothesis of the "increase of nutrients (P, K, B)" occurs. On the other hand, at deeper of the root system verified a reduction of the nutrient stock in the surface of the soils.

Keywords: Nutrients from the topsoil. Nutrients from the subsoil. *Eucalyptus*. Forest. Ferralsol. Tropical tree, Brazil.

4.1 INTRODUÇÃO

Nos ecossistemas tropicais, muitas vezes a limitação dos fatores de crescimento da planta é a disponibilidade de nutrientes no solo (RÖMHELD e KIRKBY 2010; DARUNSONTAYA *et al.*, 2012). Neste contexto, o sistema radicular é assim, um grande compartimento que pode ser particularmente afetado pelas limitações físicas e químicas do solo. O funcionamento do sistema radicular é bem conhecido pela sua considerável plasticidade e, portanto, seu papel adaptação da planta a condições adversas, incluindo seca e baixa fertilidade natural (HUANG *et al.*, 1997; CHRISTINA *et al.*, 2017).

Para tal, torna-se indispensável entender a ciclagem de elementos pelas plantas que muitas vezes resulta em um movimento líquido de nutrientes para a superfície do solo através do transporte dentro a planta e liberação por meio de serapilheira e lixiviação direta das folhas (TRUDGILL, 1988, RICHTER e MARKEWITZ, 1995). Considerando que a absorção de nutrientes pelas plantas ocorre em maior quantidade do que a ciclagem de nutrientes, um aumento líquido deve ser esperado como resultado do ciclismo. Se a magnitude da elevação da planta for grande comparado a outros processos como lixiviação, elementos fortemente ciclados terão menor profundidade vertical de distribuição do que os menos ciclados. Essas hipóteses formam o que chamamos de "hipótese da elevação dos nutrientes" (JOBÁGY e JACKSON, 2001). O aumento de nutrientes também pode interagir com outras influências das plantas na dinâmica da litosfera elementos, como o aumento da absorção de nutrientes, através de mecanismos como o desenvolvimento de complexos com adições de matéria orgânica ao solo (ANDERSON, 1988), resistência química aumentada de rochas (VOLK, 1998) e retenção partículas de solo / rocha e os produtos sólidos dos seus intemperismo como resultado do controle da erosão (STALLARD, 1992).

Várias linhas de evidências apoiam a hipótese do aumento de nutrientes. As distribuições verticais dos elementos derivados principalmente a partir da litosfera consistem em padrões globais que refletem sua importância para as plantas, com maiores concentrações de P e K no solo a outros elementos vegetais menos importantes (por exemplo, Na), através de uma ampla gama de ecossistemas e tipos de solo (JOBÁGY e JACKSON 2001). Esses padrões são difíceis de explicar sem

considerar a elevação de nutrientes por absorção de plantas e a ciclagem dos nutrientes.

Neste contexto, o projeto TECHS (Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídricos e Térmicos) foi concebido para entender quais são os principais estresses ambientais que afetam a produtividade e a resposta a seca do eucalipto em condições de clima tropical e subtropical. Para tal, foram plantados 36 experimentos ao longo do Brasil e do Uruguai com clones dos tipos plásticos, tropicais, e subtropicais, sendo os clones plásticos plantados em todos os experimentos, os clones tropicais em sites ou locais com clima tropical, e os clones subtropicais plantados em sites ou locais com clima subtropical.

Neste sentido, já foram dedicados muitos esforços para entender quais são os fatores climáticos, dendrométricos, ecofisiológicos que governam a produtividade do eucalipto (SCOLFORO *et al.*, 2019a; SCOLFORO *et al.*, 2019b; BINKLEY *et al.* 2017; HAKAMADA *et al.*, 2017). No entanto, ainda são incipientes os estudos da plataforma TECHS que abordam a influência do solo na produtividade, resposta a seca do eucalipto, bem como sobre a contribuição dos solos das camadas profundas no potencial suprimento de nutrientes.

O objetivo do presente trabalho foi caracterizar a distribuição vertical dos atributos dos solos em camadas profundas de plantios de eucalipto no Brasil, e objetiva-se ainda gerar modelos para obtenção de estimativas dos teores dos atributos dos solos das camadas profundas.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

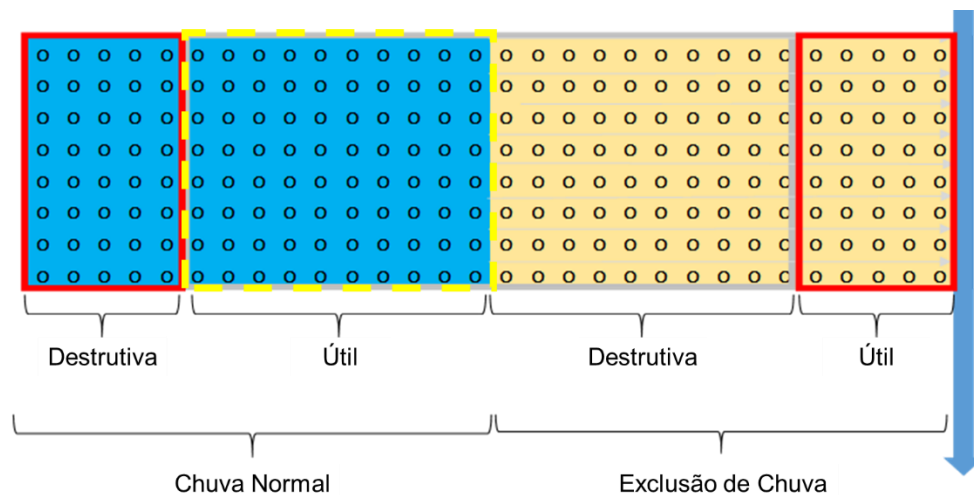
4.2.1 Caracterização Experimental geral

O experimento faz parte da Rede Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídrico e Térmico (TECHS; <http://www.ipef.br/techs/>), que é uma pesquisa colaborativa internacional envolvendo 42 instituições (empresas, universidades e centros de pesquisa), coordenados pelo Instituto de Pesquisa e Estudos e Florestais (IPEF). A rede experimental completa conta com 34 experimentos plantados em um gradiente climático no Brasil e 2 sítios no Uruguai, sendo 36 sítios experimentais no total. Neste estudo foram avaliados apenas 4 destes sítios / locais: Três Lagoas – MS (Sítio 13), Mogi Guaçu – SP (Sítio 20), Telêmaco Borba – PR (Sítio 22), Bocaiúva – MG (Sítio 30).

Cada parcela foi composta por 240 plantas por parcela, sendo 8 linhas por 30 árvores (parcela de 24 X 90 m), com árvores em um espaçamento de 3 x 3 m (1111 árvores ha⁻¹) (Figura 9). Uma borda de cada parcela tinha 5 linhas (cada uma com 8 árvores) disponível para amostragem destrutiva durante toda a duração do Projeto, e que não foram realizadas amostragem de solos.

Um sistema de exclusão de chuvas foi instalado com calhas no meio do terreno (cerca de um ano após plantio) para remover cerca de 33% da precipitação. Os tratamentos de remoção de chuva foram aplicados para simular condições de seca, e não consideraremos a amostragem dentro do sistema de exclusão de chuvas.

Figura 9 - Esboço de uma repetição completa do teste de estresse hídrico do TECHS com o 1 clone (A1). Observe a linha de drenagem central. Dimensões totais de 21 m x 87 m (8 linhas por 30 plantas, espaçamento de 3,0 m x 3,0 m). Os gráficos entre as linhas vermelhas representam as parcelas destrutivas. A amostragem do solo ocorreu na parcela útil com precipitação normal na linha em amarelo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Foram geradas as recomendações de adubação em função das análises de solos realizadas antes do plantio dos experimentos, sendo que as amostras foram coletadas nas camadas de 0-40cm. Um “plus” de 10% foi acrescentado nas recomendações de adubação de todos os sítios do TECHS para garantir que não houvesse qualquer limitação nutricional nos experimentos. Neste sentido, todas as parcelas foram fertilizadas durante o primeiro ano com 70 kg N ha⁻¹, 45 kg P ha⁻¹, 85 kg K ha⁻¹, 500 kg Ca ha⁻¹, 90 kg Mg ha⁻¹, 40 kg S ha⁻¹, 3 kg B ha⁻¹, 1 kg Cu ha⁻¹ e 1 kg Zn ha⁻¹. As fontes de fertilizantes utilizadas foram: NPK + micros, calagem e gessagem. O parcelamento de aplicação de fertilizantes variou entre os locais, com a aplicação total dividida entre 2 a 4 aplicações, desde o pré-plantio até 12 meses de idade. Herbicidas foram usados para manter as parcelas livres de plantas daninhas.

Os plantios foram realizados em áreas de reforma florestal, pastagens, bem como em áreas de Cerrado Nativo. O número de rotações variou de 1^o a 5^o rotação florestal (Tabela 7), sendo a duração da rotação florestal média entre 6-7 anos. O preparo de solo foi o operacional das empresas florestais brasileiras, que e em média

variaram de 40 a 50 cm de profundidade, e estrondamento lateral de 70 cm, utilizando o subsolador / escarificador para o preparo de solo.

Tabela 7 - Histórico de uso e ocupação do solo antes da instalação do TECHS.

TECHS	Município	Estado	Espécie / Vegetação Anterior ao Experimento	Data de Plantio	Número de Rotações	Anos de Ocupação do Solo (AOS)
13	Três Lagoas	MS	Pastagem	07/05/2012	1 ^a	0 anos
20	Mogi-Guaçu	SP	<i>Eucalyptus</i> sp.	16/02/2012	5 ^a	45 anos
22	Telemaco Borba	PR	<i>Eucalyptus</i> sp.	29/02/2012	2 ^a	8 anos
30	Bocaiúva	MG	<i>Eucalyptus</i> sp.	21/12/2011	3 ^a	20 anos

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.7

O preparo do solo foi o operacional das empresas florestais brasileiras, cuja média variava de 40 a 50 cm de profundidade, e o agachamento lateral de 70 cm, utilizando o subsolador / escarificador para preparo do solo. Essas informações serão importantes para justificar o conteúdo dos atributos do solo, bem como os resultados de produtividade e resposta à seca apresentados neste estudo.

O Clone utilizado na avaliação foi o A1 que possui boa adaptabilidade e crescimento em temperaturas entre 16 a 27°C; faixa de precipitação pluviométrica variando de 1000 a 2000 mm por ano; ocorrendo em clima subtropical a tropical; ocorrência natural em climas predominantemente Aw e, em menor escala, nos climas Af, Am, Cwa e Cwb; e o clima em que o clone foi selecionado Cwa.

Este clone foi escolhido para a realização deste trabalho devido ao fato deste ser um dos clones mais plantados em todo o Brasil, e, desse modo, ampliaria as possibilidades de extrapolações dos resultados deste estudo para muitas empresas e condições experimentais. Outro fato para a escolha deste material genético, segundo Faria *et al.* (2008), híbridos de *Eucalyptus urophylla* são mais produtivos e mais eficientes na absorção e utilização de N, P e K. Exemplos de estudos envolvendo a utilização do clone A1 (*Eucalyptus urophylla*), utilizado nesta pesquisa são os de Pinto *et al.* (2011), que estudaram a eficiência nutricional de seis clones de eucalipto na fase de mudas cultivados em solução nutritiva. Os resultados obtidos demonstraram que entre os genótipos avaliados os clones 386 e A1 foram os mais eficientes na utilização de N e na absorção e utilização de P, sendo esses clones fundamentais para o uso mais racional de P, contribuindo para a redução dos custos da fertilização, sem comprometer a produtividade do sítio florestal, e apresentando ainda maior eficiência

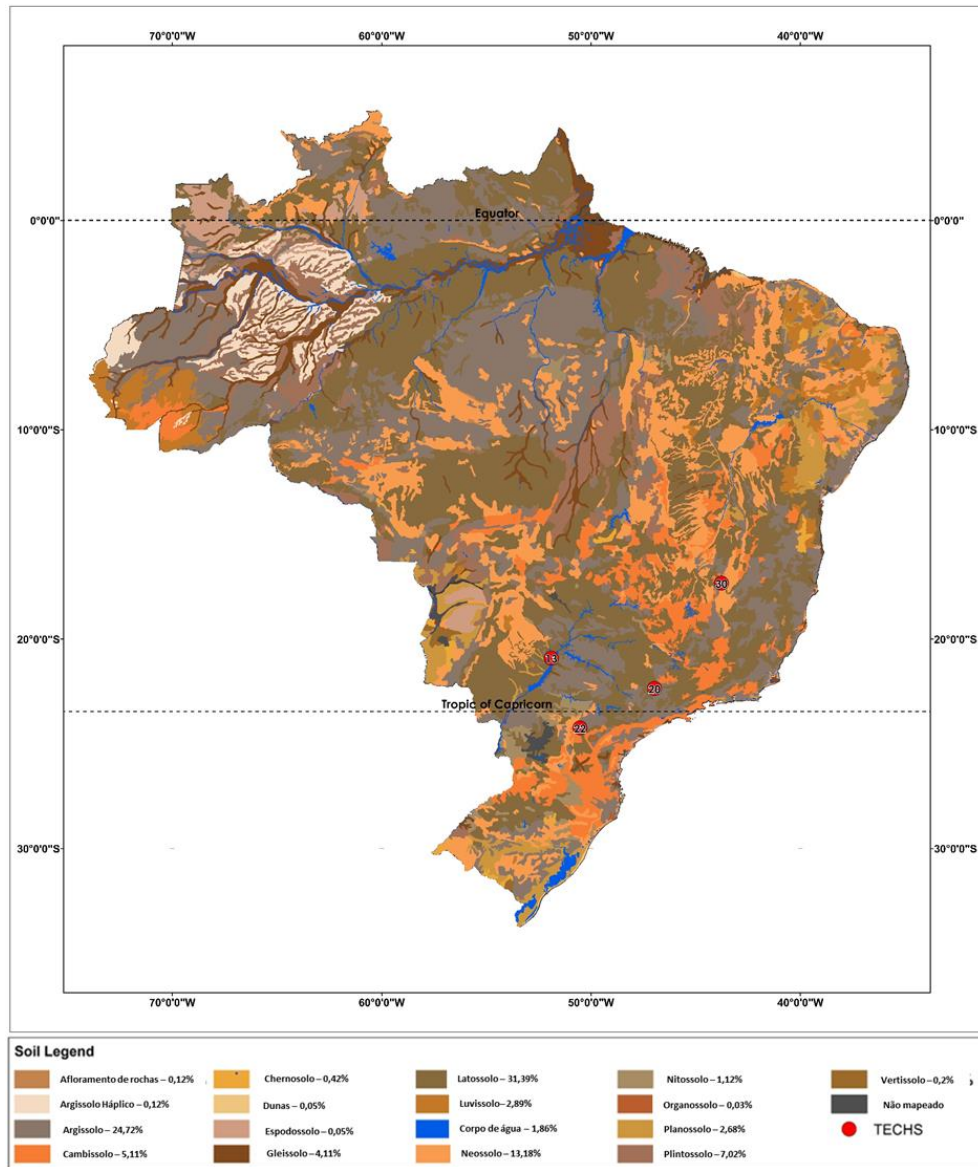
na utilização de K, pois conseguem se estabelecer em solos com menor disponibilidade desse nutriente sem comprometer a produção de biomassa.

4.2.2 Caracterização Edafoclimática

A ordem do solo com ocorrência em todos os 4 experimentos foi Latossolo (Figura 10). De acordo com o mapeamento mais atualizado de solos no Brasil (SANTOS *et al.*, 2011b) o Latossolo ocorre em aproximadamente 31,39% do território brasileiro, e isso mostra que as áreas florestais são geralmente deslocadas para áreas marginais com menor fertilidade natural e solos altamente intemperizados, porém profundos, como é o caso do Latossolo (Figura 10).

Neste sentido, os resultados gerados por esta pesquisa representam a ordem dos Latossolo que são solos com ampla abrangência no Brasil, e os seus resultados podem ser extrapolados com certa segurança para condições similares as deste estudo, conforme a Figura 10.

Figura 10 – Mapa de solos do Brasil e localização dos quatro sítios do TECHS utilizados neste estudo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Adaptado de Santos et al. (2011b).

Estações meteorológicas foram instaladas em cada sítio do TECHS em 2012, o que nos permitiu registrar dados meteorológicos diariamente. Nos casos dos sítios que não possuíam estações meteorológicas próprias, utilizou-se então os dados da rede de estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Variáveis como temperatura média anual (T_m °C), precipitação média anual (P (mm)), déficit hídrico no solo (DEF (mm)), evapotranspiração potencial e real média anual (ETP e ETR (mm)) calculada pelo método Penman-Monteith usando a

capacidade de armazenamento da água no solo no local específico de cada sítio segundo a metodologia proposta por Rolim *et al.* (1998) (Tabela 8).

Para a caracterização climática dos sítios optamos pela realização da classificação climática de Koppen (Koppen, 1936), como feito recentemente por Kottek *et al.* (2006), Peel *et al.* (2007) e Alvares *et al.* (2013), a fim de permitir reprodutibilidade da classificação climática para eventuais estudos futuros.

Percebe-se uma ampla variação de temperatura média do ar entre os experimentos avaliados (7,5 °C). Neste sentido, nota-se que os sítios são muito diferentes em termos climáticos, ocorrendo nos climas tropicais (e.g. sítio 13 com clima tropical) e subtropicais (e.g. sítio 22 com clima subtropical).

É sempre interessante amostrar sítios em climas diferentes para estudos ambientais, em especial, para estudos com camadas profundas de solos, pois pode-se perceber, por exemplo, a lixiviação de alguns nutrientes para as camadas profundas dos solos em condições edáficas diferentes. Ou ainda, pode-se perceber a rápida dinâmica da matéria orgânica do solo através da microbiota em solos tropicais, e lenta em solos subtropicais.

Tabela 8 - Descrição climática de 4 dos sítios do TECHS ao longo da condução do experimento. Dados coletados em estações meteorológicas próprias dos sítios.

TECHS	Att.	Município	Estado	Tm °C	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	Clima	Classe de Koppen
13	361	Três Lagoas	MS	25,3	1123	1325	1027	298	Tropical	Aw
20	633	Mogi Guaçu	SP	22,3	1255	942	867	75	Tropical	Aw
22	888	Telêmaco Borba	PR	17,8	1436	569	561	7	Subtropical	Cwb
30	848	Bocaiuva	MG	24,4	609	1179	570	609	Tropical	As

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.2.3 Coleta de Solos

As coletas foram realizadas no sítio 13 ao longo do mês de setembro de 2018 (idade do plantio 77 meses), sítio 20 em junho de 2018 (idade do plantio 77 meses), sítio 22 em agosto de 2018 (idade do plantio 79 meses), sítio 30 em abril de 2018

(idade do plantio 77 meses). Estas idades foram escolhidas em função das rotações florestais no Brasil ocorrerem entre os 72 a 84 meses de idade dos plantios. A amostragem de solos foi realizada juntamente com o trabalho de levantamento de biomassa de raízes finas do TECHS, dados estes não divulgados neste trabalho. As amostras foram realizadas por meio de coletas de solo com trado motorizado. O sistema é composto por um motor movido a gasolina com potência de 6,5 HP, acoplado a um redutor onde se encaixam hastes de ferro de 1 e/ou 3 m (Figura 11 A). Na extremidade da haste é acoplada uma broca de 100 mm de diâmetro e 40 cm de altura, responsável pela coleta do solo. As coletas foram realizadas até a profundidade máxima em que se encontraram raízes, sendo cavado dois metros além de onde foi encontrada a última raiz ou até que houvesse camada de impedimento, como a presença de rochas.

Apenas os torrões de solo retirados da broca foram coletados, excluindo-se o solo da porção superior da broca, de modo a evitar contaminação das amostras com o solo das camadas superiores (Figura 11 B).

Figura 11 - A) Coleta de solo com trado motorizado para amostragem de raízes finas; **B)** detalhe do torrão de solo contendo raiz.

A)



B)



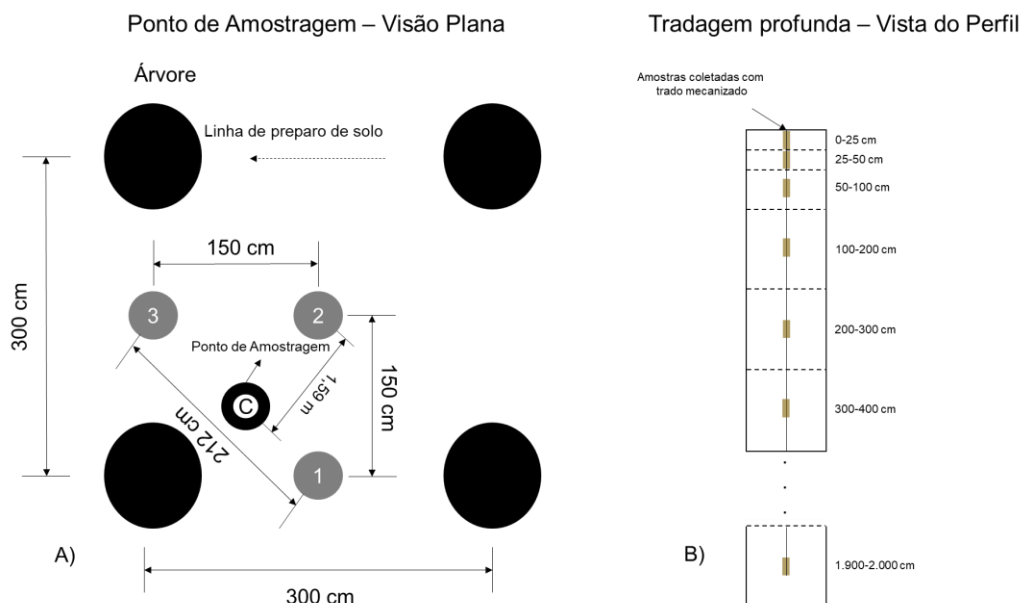
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A fim de padronizar a posição das coletas, foi definido que a coleta seria realizada na região entre plantas que se encontra a quantidade de raízes medianas, segundo apontado em estudos anteriores realizados por Laclau *et al.* (2013). Neste sentido, os autores indicam que modelos locais e globais de densidades de raízes

finas não foram significativamente diferentes para os perfis próximos e distantes da base do tronco, aos 3,5 e 6 anos após o plantio. Este sugeriu que a exploração do solo pelas raízes não era muito influenciada pela distância da árvore mais próxima durante a segunda metade do ciclo de rotação, ou seja, não faria muito sentido coletar as raízes muito próximas ao tronco.

Então foram dimensionados os ponto de apoio 1 – entre plantas; ponto de apoio 2 – entre linhas no centro de quatro plantas; ponto de apoio 3 – entre linhas e no centro das duas plantas; ponto de coleta C – localizado no centro do quadrado formado entre os pontos 1, 2, 3, e o tronco da árvore de referência da parcela (Figura 12).

Figura 12 - Esquema de amostragem de solo nos quatro locais do TECHS. A) Ponto de coleta do solo (C) localizado entre os pontos de apoio 1, 2, 3 (pontos não coletados) para evitar pontos de coleta muito próximos às plantas e também pontos distantes dos troncos. B) Perfil do solo coletado até o momento em que as raízes foram observadas, exceto o sítio 13, que interrompeu a coleta a 2.000 cm de profundidade.

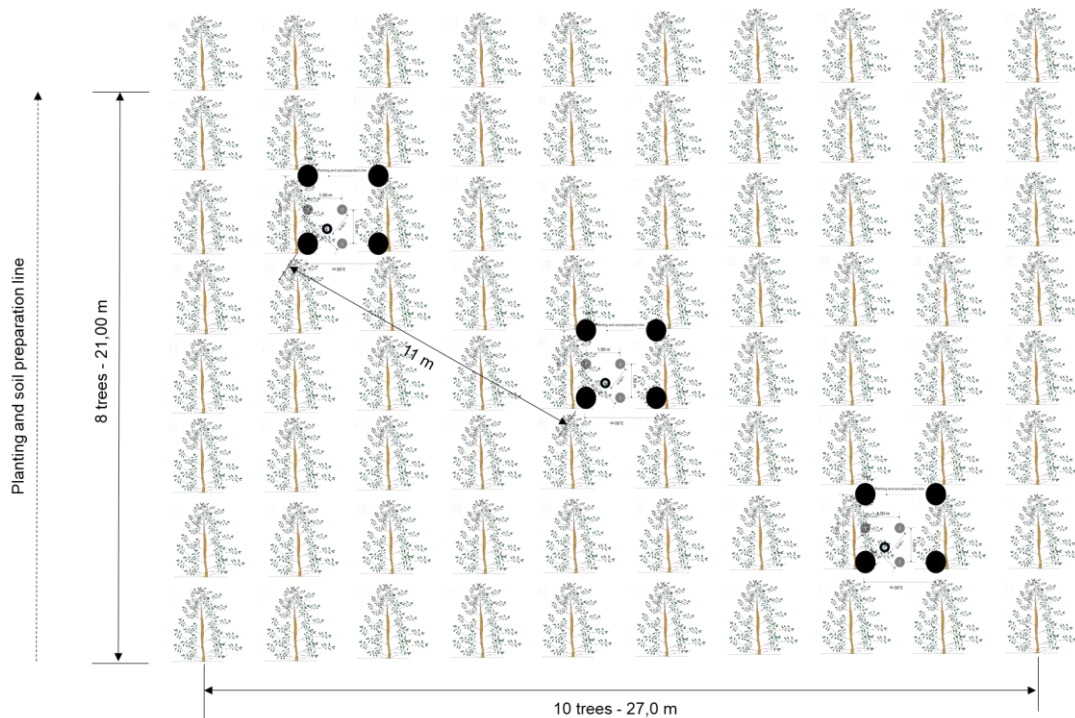


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O perfil do solo foi dividido em camadas (0-25, 25-50, 50-100, 100-200 e a cada 100 cm até a profundidade máxima de raízes finas) cujas amostras foram coletadas e acondicionadas em sacos plásticos, para não ocorrer perda de umidade.

Foram coletados 3 perfis de solos em cada sítio (Figura 13), separados em torno de 11 metros uns dos outros.

Figura 13 – Esquema de coleta de solos mostrando os locais de coleta dentro da parcela útil e fora do sistema de exclusão de chuva do TECHS.

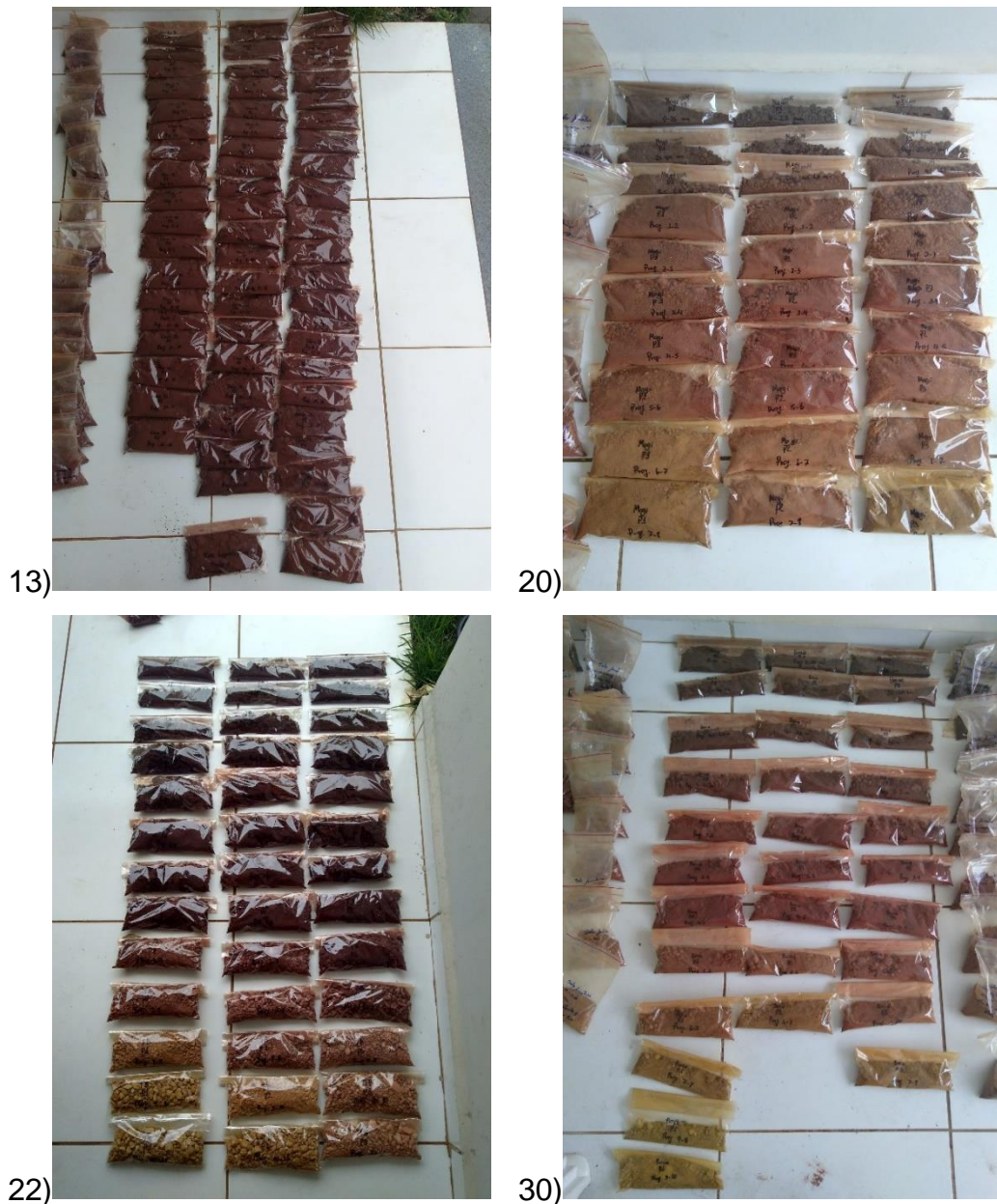


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na figura 14, observa-se as amostras de solos após a coleta, evidenciando claramente a questão do clareamento das cores em função do aumento da profundidade para os sítios 20, 22 e 30, onde as amostragens de raízes foram até a rocha, sendo que o mesmo não ocorreu para o sítio 13, onde o solo é muito profundo. A cor do solo apresenta-se bruno-avermelhado-escuro nas camadas superiores e vermelho-escuro a amarelas em profundidade, mostrando influência dos óxidos de ferro na composição desses solos. Em linhas gerais de gênese pedológica, o solo

apresenta diferentes cores em profundidade, sendo 1) A parte superficial é escurecida pela matéria orgânica; 2) A porção central exibe cor vermelha (ou amarelada, em alguns casos) por causa do óxidos de ferro; 3) logo abaixo vem a rocha alterada de cor vermelha e acinzentada; 4) por último, tem-se a rocha fresca ou preservada, que ainda não foi alterada.

Figura 14 – Amostras de solos coletadas nos sítios 13, 20, 22, e 30 do TECHS no Brasil organizadas verticalmente e na ordem decrescente.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.2.4 Análises de Solos

Matéria orgânica (M.O.) determinada pelo método de digestão do bicromato de sódio (RAIJ *et al.*, 1987). Teor de cálcio (Ca) extraído com KCl 1 mol L⁻¹ e analisado por análise de titulometria (EMBRAPA, 1997). Teor de fósforo (P) e teor de potássio (K) disponível por meio de extrator de resina de troca aniônica e determinado, respectivamente, por colorimetria e fotometria de chama. As análises de enxofre (S-SO₄²⁻) através do ataque da amostra com HCl 1:1, precipitação com BaCl₂, calcinação do BaSO₄ e determinação gravimétrica do precipitado (EMBRAPA, 1997). Esta determinação, aliada ao baixo pH serve de referência para a caracterização de solos tiomórficos. A determinação da capacidade de troca de cátions (CTC) pelo método do KCl N. (EMBRAPA, 1997). Micronutrientes do solo, por exemplo, teor de cobre (Cu) e teor de zinco (Zn) extraídos por Mehlich-1 (ABREU *et al.*, 1995); teor de boro (B), pesando 20 g de solo com 40 ml de água deionizada, aquecido a ebulição sob refluxo durante cinco minutos e, após arrefecimento da solução, três gotas de CaCl₂ 0,1 mol L⁻¹ e filtrado o material para as determinações de boro (EMBRAPA, 1997). Em relação à análise física, foi realizada análise granulométrica pelo método do densímetro (EMBRAPA, 1997), e as amostras foram dispersas com hexametáfosfato de sódio, sendo consideradas a granulometria de argila (ARG), silte (SLT) e areia total (AT).

Para padronizar as unidades e avaliar o estoque de nutrientes e de matéria orgânica no solo no TS, foram utilizadas as equações abaixo, conforme metodologia proposta por Jobbágy e Jackson, 2001.

Equação 1

$$STS_{P, B, Cu, Zn} \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = \sum_{i=0 \text{ cm}}^{n=50 \text{ cm}} P, B, Cu, Zn * T * 0,1$$

Equação 2

$$STS_K \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = \sum_{i=0 \text{ cm}}^{n=50 \text{ cm}} K * T * 39,1 * 0,1$$

Equação 3

$$STS_{Ca} \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = \sum_{i=0 \text{ cm}}^{n=50 \text{ cm}} Ca * \frac{40,07}{2} * T * 10000$$

Equação 4

$$STS_{M.O.} \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)} = \sum_{i=0 \text{ cm}}^{n=50 \text{ cm}} M.O. * T * 10000$$

Em que:

STS = estoque de nutrientes e matéria orgânica no topo do solo, em kg ha⁻¹ ou Mg ha⁻¹, respectivamente.

i = início da camada avaliada.

n = final da camada avaliada.

T = espessura da camada avaliada em cm.

P, B, Cu, Zn = teor de fósforo (P), boro (B), cobre (Cu), zinco (Zn) no solo em mg dm⁻³.

K = teor de potássio do solo (K) em mmol dm⁻³.

Ca = conteúdo de cálcio (Ca) no solo (Ca) em mmol_c dm⁻³.

M.O. = teor de matéria orgânica do solo (M.O.) em Mg ha⁻¹.

O estoque total de nutrientes e de matéria orgânica no perfil do solo de cada sítio foi calculado pela integração dos conteúdos dos nutrientes presentes em todas as camadas do perfil do solo, variando obviamente a profundidade efetiva do solo em cada sítio, conforme com as equações descritas acima. Por exemplo, o sítio 13 possui profundidade total do sistema radicular (PTSR) de 1900cm, o sítio 20 até 800 cm, o sítio 22 possui 1100 cm, o sítio 30 possui 800 cm.

Neste sentido, foram calculados também a proporção de nutrientes e de matéria orgânica do topo do solo (0-50cm) (TSP) em relação ao conteúdo total de nutrientes e de matéria orgânica presente no perfil do solo.

4.2.5 Análises Estatísticas

Teve-se dificuldade de coletar grandes quantidades de solos nas camadas superficiais (0-25, 25-50, 50-100) devido a amostra ser quarteada para dois estudos. Neste sentido, teve-se perdas de algumas parcelas, em especial, nas parcelas da superfície. Neste sentido, para garantir a acurácia dos dados, utilizou-se a metodologia de estimativa de parcela perdida, conforme metodologia proposta em Barbin (2003). O método consiste na atribuição de um valor arbitrário, no caso deste estudo a média das parcelas existentes em um mesmo tratamento (e.g. profundidades de um mesmo sítio), e procedemos com a estimação da parcela perdida, conforme a equação abaixo:

$$x = \frac{J \sum_{i=1}^n B + IT - \sum_{i=1}^n G}{(J-1)(I-1)}$$

x = valor estimado da parcela perdida

J = número de repetições por sítio;

B = somatório de uma repetição em um mesmo sítio (“bloco”);

I = número de profundidades;

T = valor do atributo do solo no tratamento em questão.

G = somatório da matriz total do experimento.

Como os valores de algumas parcelas foram estimados, a soma das frações de argila, silte, areia fina e areia grossa muitas vezes não totalizaram 1000 g kg⁻¹. Neste sentido, prosseguiu-se com o ajuste proporcional de todas as frações do solo, de forma que os valores seriam totalizados em 1000 g kg⁻¹.

O objetivo foi avaliar diferenças significativas entre sítios (13, 20, 22, 30) e em cada profundidade. Neste sentido, foi realizada a análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5% entre os sítios, profundidades avaliadas, e a interação entre sítios e profundidades. Desse modo, o experimento foi conduzido então como um delineamento inteiramente casualizado, disposto em esquema fatorial: 4 sítios X 10 profundidades, com três repetições. Com isto, a análise de variância foi realizada até os 800 cm em todos os sítios, pois um dos princípios da estatística experimental

é o balanceamento entre os tratamentos, e os sítios 20 e 30 possuíam profundidade de apenas 800 cm. Isto limitou um pouco a análise da médias dos atributos de solos em profundidade.

Nós investigamos a autocorrelação dos resíduos de profundidade quando se utiliza modelo linear simples e um modelo de efeitos mistos com dois fatores fixos (sítios e tratamento), um aleatório fator (replica) e um fator preditivo (profundidade). Assim, pareceu mais relevante usar um modelo exponencial com três fatores principais (sítios, profundidade, réplicas) e suas interações para se adequar aos nossos resultados, conforme realizado por Pradier *et al.*(2017). As análises estatísticas foram realizadas com o software SIGMAPLOT 6 ®. Para as representações gráficas, a média dos valores foram calculados a partir de nossas réplicas (n = 3), bem como os desvios padrão. Devido aos resultados apresentados dos atributos de solos em várias profundidades e vários sítios, não se apresenta os modelos nos gráficos dos atributos de solos para evitar “poluir” os gráficos, e apresenta-se apenas nas tabelas.

Foram ajustados modelos em função de cada atributo de solos e em cada sítio. Neste sentido, modelos 1 (modelos locais para cada sítio) e modelo 2 (modelo global para todo o conjunto de dados) foram instalados utilizando o SIGMAPLOT 6 ®.

A partir dos resultados da análise de variância procedeu-se com o teste de médias Scott-Knott para auxiliar na discussão dos resultados com nível de 5% de significância.

Foram aplicados análises de componentes principais (PCA) para mapear variáveis (atributos de solos PTRS, AOS) e atributos de clima (T_m °C, P (mm), DEF (mm), ETP (mm)) mais importantes para descrever o processo de TSP; como por exemplo, variáveis-chave que representam bem o fenômeno da acumulação dos nutrientes na superfície do solo (TSP). Então aplicou-se as dimensões assim derivadas a um novo conjunto de casos e variáveis (2 dimensões com as principais variáveis-chave obtidas nos PCA's. Utilizaram-se também variáveis suplementares para a extração de componentes principais das variáveis relacionadas ao TSP, e discriminá-las das variáveis respostas nos gráficos de PCA. A partir da identificação das principais variáveis-chave, foram realizadas análises de regressão não lineares para identificar e propor equações entre os atributos de solos e o TSP.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Percebe-se claramente que existe um forte contraste dos teores dos atributos do topo do solo em relação ao subsolo, exceto para silte e sulfato, que em média não apresentaram diferenças significativas entre o topo e o subsolo (teste Scott-Knott, $p < 0,05$). Já no caso da fração areia total, o comportamento foi o contrário, o topo apresentou menor conteúdo de areia em relação ao subsolo (SS) (Tabela 9).

Um dos motivos que podemos apontar para as diferenças existentes entre o TS e o SS é o fato que: 1) a exsudação da raiz diminui muito com a profundidade do solo, como consequência de uma diminuição significativa na atividade de exsudação específica da massa da raiz para quase um quinto da atividade do solo superficial de plantações de *Fagus sylvatica* L. (TÜCKMANTEL *et al.*, 2017); 2) Outro ponto é o fato da diminuição na atividade metabólica específica de 312 mg Cg⁻¹ ano⁻¹ no solo a 80 mg Cg⁻¹ ano⁻¹ a 130 cm de profundidade foi amplificada; 3) por uma diminuição exponencial da biomassa da raiz por volume de solo, levando a um relativo diminuição da exsudação radicular por volume no SS para 2% da exsudação da raiz do solo (1 g C 10 cm⁻¹ m⁻² anos⁻¹ a 130 cm de profundidade); 4) e todos os outros fatores culminam obviamente pelo fato do SS ser muito menos influenciado pela matéria orgânica do solo (LAUCLAU *et al.*, 2013).

Os coeficientes de variação apresentaram em média valores elevados (40% CV) (PIMENTEL-GOMES; GARCIA, 2002), variando de muito baixos 0% (e.g. teores de fósforo no subsolo do sitio 13), a muito altos 158% (e.g. teores de sulfato no subsolo do sitio 20).

A dispersão dos atributos químicos está de acordo com os encontrados na literatura em trabalhos com *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Pinus taeda* (BARBOSA *et al.*, 2012). Nota-se claramente e sistematicamente uma tendência dos nutrientes aniônicos (P e S- SO₄²⁻) apresentarem pouca dispersão ou variação espacial, comparativamente aos catiônicos, por exemplo, K e Ca. Estas diferenças atribuídas ao número de interações muito mais elevados que os aniônicos possuem no solo comparados aos catiônicos (NOVAIS *et al.*, 2007).

A média global dos teores de fósforo apresentaram valores baixos no TS e muito baixos SS, segundo a interpretação de análises de solos de Raij *et al.* (1996) para culturas florestais. Já para os teores de potássio foram classificados como muito baixo no TS e SS. Já para cálcio e boro médio no TS e baixo no subsolo. Já para cobre e sulfato alto no TS e SS. Já para o zinco os teores foram baixo no TS e SS. Para matéria orgânica médio no TS e baixo no SS (RIBEIRO *et al.*, 1999). Já para CTC muito no TS e SS. Para o teor de argila global do TS e do SS seria caracterizado como textura média segundo a classificação da Embrapa (EMBRAPA, 2006), entretanto, observou-se uma variação de granulometria entre os sítios, sendo observado um gradiente de textura arenosa, média, argilosa, muito argilosa no TS e SS para os sítios 13, 20, 22, 30, respectivamente.

Este padrão dos teores dos nutrientes pode ser explicado pela ciclagem biogeoquímica de plantações florestais, ou seja, os nutrientes e carbono com baixa mobilidade (P, Ca) no solo acumulam-se com o passar do tempo, enquanto os nutrientes com elevada mobilidade (K), são lixiviados para camadas mais profundas e pouco acumulados no ambiente edáfico superficial (LACLAU *et al.*, 2013), sendo este fato bem evidente neste trabalho devido ao fato dos atributos de solos da superfície serem em sua maioria mais enriquecidos que os nutrientes presentes no SS. Em estudos preliminares Pradier *et al.* (2017) encontraram valores mais altos de K no solo, que variaram de 60 a 100 mg kg⁻¹ (com um outlier valor de 148 mg kg⁻¹ na profundidade de 1 m no controle tratamento) nos tratamentos com e sem exclusão de chuvas em Itatinga - SP. Os valores de K total no solo não foram influenciados por exclusão através do solo ou pela profundidade do solo (PRADIER *et al.*, 2017). A adubação neste experimento foi de 176 kg ha⁻¹ de K, enquanto em nossos experimentos a dosagem de K ficou em torno de 85 kg ha⁻¹ de K, outro ponto a ser considerado é fato da textura do solo ser um pouco mais argilosa em comparação com este estudo.

Tabela 9 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação obtidos nos sítios TECHS 13, 20, 22 e 30 em função dos teores de fósforo, potássio, cálcio, boro, cobre, zinco, matéria orgânica, capacidade de troca de cátions, sulfato, argila, silte, e areia total no topo e no subsolo.

Atributo do Solo	Posição	Sítio														Global	
		13			20			22			30			Desvio	CV	Média	Desvio
		Média	Desvio	CV	Média	Desvio	CV	Média	Desvio	CV	Média	Desvio	CV				
P	TS	2,67	1,63	61 %	5,50	3,94	72%	3,67	1,03	28%	4,50	2,43	54%	4,08 A	2,26	54%	
	SS	1,00	0,00	0%	1,04	0,20	20%	1,12	0,42	37%	1,33	1,13	85%	1,12 B	0,44	35%	
K	TS	0,22	0,08	35 %	0,58	0,33	56%	0,55	0,16	30%	0,43	0,20	45%	0,45 A	0,19	41%	
	SS	0,11	0,09	83 %	0,20	0,09	42%	0,41	0,50	120 %	0,18	0,11	59%	0,23 B	0,20	76%	
Ca	TS	1,17	0,41	35 %	13,33	13,32	100 %	1,17	0,41	35%	2,00	1,10	55%	4,42 A	3,81	56%	
	SS	1,11	0,31	28 %	1,46	0,93	64%	1,30	0,88	68%	1,00	0,00	0%	1,22 B	0,53	40%	
B	TS	0,36	0,08	24 %	0,29	0,11	37%	0,45	0,06	12%	0,82	0,30	37%	0,48 A	0,14	28%	
	SS	0,11	0,05	46 %	0,10	0,06	57%	0,14	0,07	52%	0,20	0,12	57%	0,14 B	0,07	53%	
Cu	TS	0,63	0,05	8%	0,68	0,19	28%	3,63	0,20	5%	0,60	0,00	0%	1,39 A	0,11	10%	
	SS	0,36	0,11	32 %	0,19	0,09	46%	0,39	0,43	111 %	0,23	0,13	58%	0,29 B	0,19	62%	
Zn	TS	0,18	0,08	41 %	0,78	0,91	116 %	0,35	0,08	24%	0,17	0,05	31%	0,37 A	0,28	53%	
	SS	0,08	0,04	49 %	0,05	0,05	111 %	0,16	0,14	89%	0,06	0,05	86%	0,09 B	0,07	84%	
M.O.	TS	11,50	0,84	7%	22,83	5,56	24%	36,67	5,61	15%	37,33	8,71	23%	27,08 A	5,18	18%	
	SS	6,49	0,80	12 %	8,46	2,36	28%	8,82	4,45	51%	11,63	5,90	51%	8,85 B	3,38	35%	
CTC	TS	33,55	2,08	6%	121,08	101,68	84%	132,05	18,10	14%	118,43	22,46	19%	101,28 A	36,08	31%	
	SS	20,43	1,55	8%	32,78	18,45	56%	48,53	15,93	33%	34,23	18,57	54%	33,99 B	13,62	38%	
S-SO ₄ ²⁻	TS	3,17	1,94	61 %	15,50	10,71	69%	16,00	7,18	45%	10,50	3,94	37%	11,29 A	5,94	53%	
	SS	6,39	1,94	30 %	13,46	21,20	158 %	2,97	1,42	48%	16,75	12,48	75%	9,89 A	9,26	78%	
ARG	TS	125,68	23,14	18 %	293,30	93,81	32%	504,83	16,36	3%	676,53	106,57	16%	400,08 A	59,97	17%	
	SS	188,46	32,69	17 %	387,42	44,58	12%	449,94	109,78	24%	617,43	108,99	18%	410,81 A	74,01	18%	
SLT	TS	308,97	6,70	2%	200,95	22,12	11%	65,17	9,33	14%	67,42	32,66	48%	160,63 A	17,70	19%	
	SS	224,72	31,56	14 %	188,62	32,95	17%	45,21	19,80	44%	82,71	47,67	58%	135,32 A	33,00	33%	
TTS	TS	565,36	20,76	4%	505,74	96,08	19%	430,00	13,15	3%	256,05	74,40	29%	439,29 B	51,10	14%	
	SS	586,82	26,56	5%	423,97	38,87	9%	504,85	110,35	22%	299,86	69,72	23%	453,87 A	61,37	15%	

Em que: P = teor de fósforo no solo extraído pelo método da resina de troca catiônica (mg dm⁻³); K = teor de potássio no solo extraído pelo método de troca catiônica de resina (mg dm⁻³), Ca = teor de cálcio (mmol_c dm⁻³), B = teor de boro no solo (mg dm⁻³), Cu = teor de cobre (mg dm⁻³), Zn = teor de zinco no solo (mg dm⁻³), M.O. = teor de matéria orgânica (g dm⁻³), CTC = capacidade de permuta catiônica (mmol_c dm⁻³), S-SO₄²⁻ = teor de sulfato (mg dm⁻³), ARG = Teor de argila no solo (g kg⁻¹), SLT = teor de silte no solo (g kg⁻¹), TTS = teor total de areia no solo (g kg⁻¹), TS = significa a camada no topo do solo (0-50 cm), SS = camada do subsolo (50 cm até que a profundidade do sistema radicular, local 13 = 2000 cm, local 20 = 800, local 22 = 1100 cm, local 30 = 800cm, CV = coeficiente de variação (%). Os valores dos atributos do

solo seguidos com a mesma letra não mostraram diferenças significativas entre o nível de significância de 5%.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Nota-se na Figura 15 profunda exploração de raízes finas pelo eucalipto nos 4 sítios avaliados e os respectivos conteúdo dos atributos de solos nas camadas dos solos, por exemplo, no caso do sítio 13 as raízes explorando os solos até 20 metros de profundidade. Um ponto interessante a ser considerado é a questão que alguns nutrientes apresentam gradiente negativo de conteúdo em profundidade (geralmente um comportamento exponencial decrescente), entretanto apresentam alguns picos de teores elevados próximo a rocha, e.g. teores de fósforo para os sítios 30 e 22, teores de potássio no site 22, e teores de enxofre no site 30. Neste sentido, um outro ponto importante a ser apresentado é o fato de que os sítios 20, 22, e 30 as raízes estavam próximas as rochas ou material de origem com pouco intemperismo (Figura 14), e já o site 13 trata-se de um solo extremamente profundo e não percebeu-se nenhum sinal de rochas ou de as raízes com limitação física para o crescimento, o que leva também a ausência de picos de elevada fertilidade em profundidade (Figura 14).

Discute-se aqui, que o sitio 13 possui textura arenosa e menor disponibilidade de nutrientes (Tabela 9) de forma comparativa aos demais sítios, o que pode ter forçado as raízes aprofundar mais para buscar água e nutrientes no perfil de solo.

A presença de raízes em camadas profundas do solo neste estudo pode ser explicada como uma combinação de fatores favoráveis, incluindo altas necessidades de água nas plantações brasileiras de eucalipto (CABRAL *et al.*, 2010) para uma GPP de cerca de $4.000 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ no local do estudo (CAMPOE *et al.*, 2012), favoráveis temperatura do solo e a transpiração para crescimento radicular em camadas profundas do solo (THONGO M'BOU *et al.*, 2008) e a falta de limitações físicas ou químicas no crescimento das raízes no solo.

Correlacionou-se a profundidade com todos os atributos de solos, e notou-se coeficiente de correlação de Pearson negativos com os atributos de solos P (R = -0,31), M.O. (R = -0,54), CTC (R = -0,43), B (R = -0,41), Cu (R = -0,25), argila (R = 0,45), e outro grupo com correlações positivas, como por exemplo, TTS (R = 0,50), silte (R = 0,23). Percebe-se que os atributos de solos K, Ca, S-SO_4^{2-} não apresentaram

correlação linear de Pearson com a profundidade. Houve uma correlação significativa e negativa entre as concentração e abundância do solo para K, Ca e Mg trocáveis, e P extraível e $S-SO_4^{2-}$ (Figura 15) ($p < 0,01$) (JOBÁGY; JACKSON, 2001).

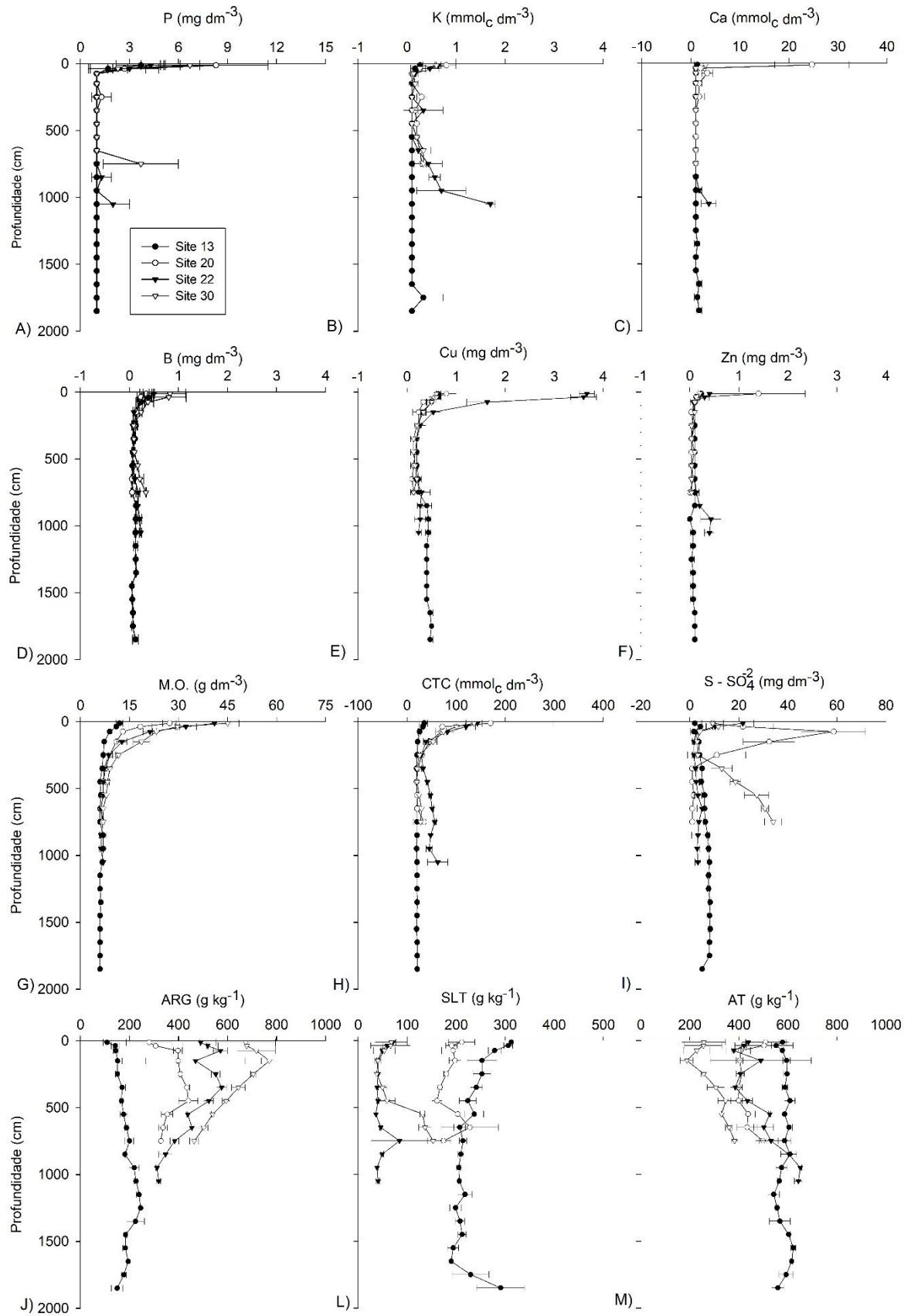
A concentração de K no solo foi significativamente alterada com profundidade ($p < 0,001$) em trabalhos realizados por Pradier *et al.* (2017). A distribuição vertical do concentrações de K trocável no perfil do solo seguiu uma função de potência para ambos tratamentos, com um $R^2 > 0,7$. Houve uma forte diminuição da concentração de K trocável com profundidade no primeiro metro de solo (de 0,55 a 0,25 mg kg⁻¹); a diminuição foi então mais progressiva e constante entre 1 e 4 m de profundidade do solo, exibindo novamente uma diminuição de duas vezes.

O deslocamento da frente de aprofundamento das raízes nas plantações de *Eucalyptus* sp. foram lentas em comparação outras espécies de plantas e outros trabalhos com *Eucalyptus* sp.. A taxa de alongamento da raiz (RER) para baixo para o sítio 13 foi 0,86 cm dia⁻¹, sítio 20 foi de 0,35 cm dia⁻¹, sítio 22 foi de 0,47 cm dia⁻¹, sítio de 0,35 cm dia⁻¹. Estas taxas foram muito diferentes das taxas de crescimento em altura, por exemplo, sítio 20 apresentou taxa de altura de 1,08 cm dia⁻¹ (altura total de 24,8 m), sítio 22 foi de 1,26 cm dia⁻¹ (altura total de 29,8 m), sítio 30 foi de 0,77 cm dia⁻¹ (altura total de 17,8 m), já o sítio 13 não teve o seu inventário de altura realizado.

Uma ligeira diminuição da velocidade da frente de crescimento da raiz com a idade do povoamento nas plantações de *E. grandis* (como observado para as taxas de crescimento em altura) pode explicar porque as raízes profundas foram encontradas a uma profundidade de 9,5 m a 1,5 ano após o plantio no Brasil (CHRISTINA *et al.*, 2011) e a uma profundidade de 28 m a 9 anos de idade na África do Sul (DYE, 1996). Altas velocidades de crescimento em profundidade de raízes têm sido relatadas para algumas espécies herbáceas que crescem em solos profundos, sem impedimento para o crescimento das raízes. A série temporal do déficit hídrico após uma seca induzida em um experimento de campo mostrou que o velocidade da frente da raiz atingiu um pico em 4,4 cm dia⁻¹ para girassóis, 3,4 cm dia⁻¹ para a soja, 3,0 cm dia⁻¹ para o milho e 2,3 cm dia⁻¹ para amendoim (DARDANELLI *et al.*, 1997), todas culturas anuais. Em uma cronossequência de solo que a profundidade da frente da raiz aumentou em 2,5 cm dia⁻¹ para o sorgo e 4,1 cm dia⁻¹ para girassóis, de 20 a 60 dias após a emergência (STONE *et al.*, 2001). Para as culturas de cana-de-açúcar

no Brasil, a média velocidade da frente da raiz de 4 meses após o plantio até a colheita foi de $1,9 \text{ cm dia}^{-1}$ (BATTIE-LACLAU; LACLAU, 2009). Deste modo, percebeu-se que a velocidade da frente da raiz nunca foi medida em vários locais e espécies lenhosas crescendo em solos tropicais muito profundos e as maiores RER para espécies de árvores foram medidas em experimentos em vasos. Os valores máximos para plântulas de *E. nitens* e *E. globulus* cultivadas em rizotron foram de cerca de $2,5 \text{ cm dia}^{-1}$ (MISRA, 1999). Tem sido mostrado para mudas em rizópodes que abaixam o lençol freático e estimulam o alongamento da raiz para baixo para espécies de *Phreatophytic* (CANHAM, 2011). O RER máximo em rizópodes preenchidos com areia média a grossa foi de $3,7 \text{ cm dia}^{-1}$ para Mudas de *Banksia attenuata* e $1,8 \text{ cm dia}^{-1}$ para mudas de *Banksia littoralis* (CANHAM, 2011). RER atingiu $2,1$ e $1,4 \text{ cm dia}^{-1}$ para mudas de *Acacia tortilis* e *Faidherbia albida* em outro experimento realizado em rizopodes (STAVE *et al.*, 2005). A plasticidade na exploração do solo por raízes finas ao longo do crescimento das árvores provavelmente desempenha um papel importante na maximização do uso de recursos nas plantações de rápido crescimento (LACLAU *et al.*, 2013).

Figura 15 - Distribuição vertical dos atributos do solo nos quatro sítios do TECHS no Brasil. A) = teor de fósforo no solo extraído pelo método de resina trocadora de cátions (mg dm^{-3}); B) = teor de potássio no solo extraído pelo método da resina trocadora de cátions (mg dm^{-3}), C) = teor de cálcio ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), D) = teor de boro no solo (mg dm^{-3}), E) = teor de cobre (mg dm^{-3}), F) = teor de zinco no solo (mg dm^{-3}), G) = teor de matéria orgânica (g dm^{-3}), H) CTC = capacidade de troca de cátions ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), I) = teor de sulfato (mg dm^{-3}), J) = teor de argila no solo (g kg^{-1}), L) = teor de silte no solo (g kg^{-1}), M = teor total de areia no solo (g kg^{-1}).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Percebe-se grandes quantidades de nutrientes quando analisamos o estoque total dos nutrientes nos perfis amostrados (Estoque Total), e percentagem muito menor presente no topo do solo (STS) (Tabela 10). A média geral de TSP foi em torno de 20%, variando de 1% (e.g. 1% para o sulfato no sítio 13), a 55% (e.g. 55% para o zinco no sítio 20).

As quantidades de N, P, K, Ca e Mg acumuladas no povoado de 9 anos representaram 380, 54, 83, 100 e 56 kg⁻¹ ha⁻¹, respectivamente (LACLAU *et al.*, 2003) no Congo, sendo as necessidades reais de nutrientes do plantio aumentaram acentuadamente durante o período inicial de crescimento para atingir um máximo de cerca de 2 anos de idade na cronossequência avaliada. A partir desta idade, as exigências para N, P e Ca mantiveram-se praticamente estáveis, enquanto houve uma ligeira diminuição na exigência de K e Mg. As maiores necessidades de nutrientes no final da rotação do estande em Kondi foram o resultado de uma maior produção de biomassa (LACLAU *et al.*, 2003). Em estudos realizados por Santana *et al.* (2008) verificaram o conteúdo dos nutrientes estimados variou entre as regiões secas e úmidas, o que reflete a capacidade produtiva delas. Este mesmo autor relata que, por exemplo, comparando-se P, K, Ca na parte aérea, entre a região de maior e a de menor conteúdo, aos 6,5 anos de idade, as diferenças foram de 20, 192, 639 kg ha⁻¹. Em geral, as estimativas dos nutrientes das plantas foram menores nas regiões de menor disponibilidade de água. Nessas regiões, tal fato, associado a alta demanda evaporativa, ocasiona déficits hídricos periódicos. A ação combinada desses fatores reduz a absorção e, conseqüentemente, o conteúdo de nutrientes e a biomassa, a sua extração do solo. Neste sentido, percebe-se que os solos do sítio 30 possuem maiores quantidade de nutrientes, possivelmente em partes, devido a menor extração em comparação aos demais sítios.

Ao se analisar o STS percebe-se que nutrientes retirados do solo possuem o potencial de suprir uma boa parte das necessidades anuais durante o primeiro ano de crescimento. Entretanto, correlacionou-se a taxa de crescimento em altura com a STS, porém não encontramos correlações significativas com a STS de nenhum atributo de solo. Porém, ao analisar as correlações do STS com a AOS, percebe-se um forte efeito da idade das plantações florestais na STS, e.g. sítio 30 que possui STS – Ca de 40% com 45 anos de rotação do plantio, enquanto os demais apresentaram STS – Ca muito inferiores a este número.

A translocação interna de nutrientes na parte aérea das árvores foi muito limitada durante o primeiro ano após o plantio, mas aumentou acentuadamente no segundo ano para N, P e K. Em termos absolutos, as translocações estavam na seguinte ordem: $K > P > Ca$, e segue a mesma ordem de STS para os dados deste estudo. Segundo Laclau *et al.*(2003), em média, a translocação forneceu 60% das necessidades anuais de 4 anos de idade para K e 30-40% para N e P para os plantios de eucalipto no Congo. Neste mesmo estudo, independentemente da idade, observou-se uma tendência de acumulação de nutrientes nos tecidos senescentes (negativas translocações) foi observado para Ca.

Uma situação que se alerta neste trabalho está relacionada com a profundidade de amostragem de solos realizada pelas empresas florestais brasileiras. Nos principais boletins de agricultura brasileiros, recomenda-se que nos casos de culturas anuais e perenes retirar as amostras simples a serem instaladas na profundidade de 20 cm de amostra composta em todo o terreno em fertilidade do solo da camada arável ou agricultável. Complementa-se ainda que para fins de cálculos para uma área de um hectare e $2.000.000 \text{ dm}^3$ de solo. Amostras compostas podem também ser retiradas das camadas de 20 a 40 cm na profundidade, principalmente para avaliar a acidez do subsolo bem como os teores de enxofre, cálcio, e potássio, em áreas novas de agricultura ou silvicultura (RAIJ *et a.*, 1996; RIBEIRO *et al*, 1999). Neste sentido, percebe-se que as amostragens são relativamente superficiais, considerando-se que o sistema radicular do eucalipto atinge profundidade de até 20 metros de profundidade, ou seja, considerando-se as amostragens de solos convencionais (0-40 cm) representam apenas 2%, 5%, 4%, 2%, dos sítios 13, 20, 22, 30, respectivamente, com média de 3,25%.

Tabela 10 - Estoque de nutrientes e matéria orgânica do solo no topo do solo (STS), estoque total de nutrientes e contribuição relativa dos nutrientes presentes na camada superficial geralmente amostrados pelas empresas florestais brasileiras nos quatro sítios do TECHS no Brasil.

Sítio	STS P	STS M.O.	STS K	STS Ca	STS S-SO ₄ ²⁻	STS B	STS Cu	STS Zn
13	13,3	33,4	33,9	116,9	15,8	1,8	3,2	0,9
20	27,5	66,2	91,2	1335,7	77,5	1,4	3,4	3,9
22	18,3	106,3	86,0	116,9	80,0	2,3	18,2	1,8
30	22,5	108,3	67,8	200,4	52,5	4,1	3,0	0,8
Min.	13,3	33,4	33,9	116,9	15,8	1,4	3,0	0,8
Max.	27,5	108,3	91,2	1335,7	80,0	4,1	18,2	3,9
Avr.	20,4	78,5	69,7	442,4	56,5	2,4	6,9	1,9
C.V.	30%	46%	37%	135%	53%	49%	108%	77%

Sítio	Estoque Total P	Estoque Total M.O.	Estoque Total K	Estoque Total Ca	Estoque Total S-SO ₄ ²⁻	Estoque Total B	Estoque Total Cu	Estoque Total Zn
13	198,3	722,6	200,7	4224,0	1220,8	21,3	68,7	15,8
20	105,8	421,0	211,1	3339,2	860,8	8,4	17,1	7,1
22	136,7	607,1	440,5	2888,4	393,3	16,1	52,7	19,1
30	124,2	580,0	182,5	1703,0	1372,5	18,3	18,5	5,0
Min.	105,8	421,0	182,5	1703,0	393,3	8,4	17,1	5,0
Max.	198,3	722,6	440,5	4224,0	1372,5	21,3	68,7	19,1
Avr.	141,3	582,7	258,7	3038,6	961,9	16,0	39,2	11,7
C.V.	28%	21%	47%	35%	45%	34%	65%	58%

Sítio	TSP P (%)	TSP M.O. (%)	TSP K (%)	TSP Ca (%)	TSP S-SO ₄ ²⁻ (%)	TSP B (%)	TSP Cu (%)	TSP Zn (%)
13	7%	5%	17%	3%	1%	8%	5%	6%
20	26%	16%	43%	40%	9%	17%	20%	55%
22	13%	18%	20%	4%	20%	14%	34%	9%
30	18%	19%	37%	12%	4%	22%	16%	17%
Min.	7%	5%	17%	3%	1%	8%	5%	6%
Max.	26%	19%	43%	40%	20%	22%	34%	55%
Avr.	16%	14%	29%	15%	9%	15%	19%	22%
C.V.	50%	46%	44%	119%	98%	38%	65%	105%

Em que: STS = estoque no topo do solo (0-50 cm) em kg ha⁻¹, TSP = percentagem do teor do nutriente e matéria orgânica presente no topo do solo (%), P = estoque de fósforo no solo extraído pelo método da resina de troca catiônica (kg ha⁻¹), M.O. = estoque de matéria orgânica do solo (Mg ha⁻¹), K = estoque de potássio no solo (kg ha⁻¹), Ca = estoque de cálcio no solo (kg ha⁻¹), S-SO₄²⁻ = estoque de enxofre no solo na

forma de sulfato (kg ha^{-1}), B = estoque de boro (kg ha^{-1}), Cu = estoque de cobre (kg ha^{-1}), Zn = estoque de zinco no solo (kg ha^{-1}).

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Comparando os modelos locais (cada sítios e cada atributos dos solos) com os modelos globais (média global dos sítios e dos atributos dos solos) percebe-se que os modelos locais (R médio = 0,76, p -valor médio = 0,027) apresentaram uma acurácia superior aos modelo globais (R médio = 0,54, p -valor médio = 0,083) (Tabela 11).

Nota-se que os valores de R variaram bastante, média de 0,70, variando de 0,23 a 0,99. Os valores de p assumidos neste trabalho variaram de 0,000 a 0,341. Na verdade, assumimos valores bem mais elevados de p -valor, e uma acurácia muito menor que a tradicionalmente utilizada em vários artigos científicos, entendemos que pela relevância, amplitude dos dados e pelo ineditismo dos dados seria interessante divulgá-los até mesmo pela aplicabilidade dos mesmos nas empresas florestais brasileiras.

Neste sentido comparamos também a acurácia dos modelos exponenciais com os modelos lineares. Percebeu-se que as estimativas dos modelos exponenciais foram bem maiores que os modelos lineares.

Tabela 11 - Modelos locais e globais para predição dos teores de fósforo, potássio, cálcio, boro, cobre, zinco, matéria orgânica, capacidade de troca catiônica, sulfato, argila, silte e areia total em função dos atributos do solo e da camada de profundidade do solo.

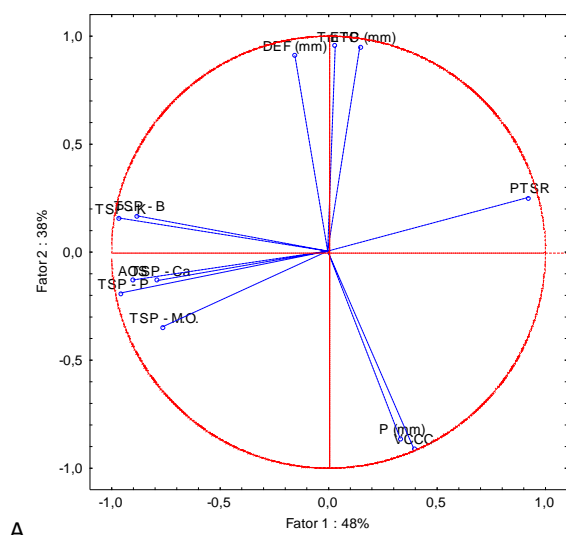
Atributo do Solo	Sítio	Equação Local	R	p - valor	Equação Global	R	p - valor
Fósforo	13	$P \text{ (mg dm}^{-3}\text{)} = 1,6177 \exp(-0,0004D)$	0,44	0,048			
	20	$P \text{ (mg dm}^{-3}\text{)} = 13,7556 \exp(-0,0410D)$	0,91	0,000			
Cálcio	20	$Ca \text{ (mmolc dm}^{-3}\text{)} = 82,0030 \exp(-0,0961D)$	0,98	0,000	$Ca \text{ (mmolc dm}^{-3}\text{)} = 2,4386 \exp(-0,0006D)$	0,32	0,158
	13	$B \text{ (mg dm}^{-3}\text{)} = 0,2475 \exp(-0,0009D)$	0,67	0,001			
Boro	20	$B \text{ (mg dm}^{-3}\text{)} = 0,2963 \exp(-0,0034D)$	0,94	0,000	$B \text{ (mg dm}^{-3}\text{)} = 0,3161 \exp(-0,0011D)$	0,66	0,001
	30	$B \text{ (mg dm}^{-3}\text{)} = 0,9519 \exp(-0,0087D)$	0,83	0,003			
Cobre	20	$Cu \text{ (mg dm}^{-3}\text{)} = 0,6690 \exp(-0,0041D)$	0,89	0,001			
	22	$Cu \text{ (mg dm}^{-3}\text{)} = 0,0005 \exp(-0,0119D)$	0,97	0,000			
	30	$Cu \text{ (mg dm}^{-3}\text{)} = 0,6175 \exp(-0,0032D)$	0,94	0,000			
Zinco	13	$Zn \text{ (mg dm}^{-3}\text{)} = 0,1287 \exp(-0,0004D)$	0,49	0,023			
	20	$Zn \text{ (mg dm}^{-3}\text{)} = 3,9290 \exp(-0,0826D)$	0,99	0,000			
	30	$Zn \text{ (mg dm}^{-3}\text{)} = 0,1617 \exp(-0,0031D)$	0,83	0,003			
M.O.	13	$M.O. \text{ (g dm}^{-3}\text{)} = 8,8340 \exp(-0,0003D)$	0,69	0,001			
	20	$M.O. \text{ (g dm}^{-3}\text{)} = 21,0510 \exp(-0,0025D)$	0,86	0,001	$O.M. \text{ (g dm}^{-3}\text{)} = 20,4491 \exp(-0,0013D)$	0,78	0,000
	22	$M.O. \text{ (g dm}^{-3}\text{)} = 38,1532 \exp(-0,0050D)$	0,90	0,000			
	30	$M.O. \text{ (g dm}^{-3}\text{)} = 38,6331 \exp(-0,0040D)$	0,93	0,000			
CTC	13	$CTC \text{ (mmolc dm}^{-3}\text{)} = 25,2136 \exp(-0,0002D)$	0,54	0,011			
	20	$CTC \text{ (mmolc dm}^{-3}\text{)} = 154,2882 \exp(-0,0089D)$	0,85	0,002	$CTC \text{ (mmolc dm}^{-3}\text{)} = 71,9449 \exp(-0,0011D)$	0,72	0,000
	22	$CTC \text{ (mmolc dm}^{-3}\text{)} = 95,0939 \exp(-0,0011D)$	0,55	0,049			
	30	$CTC \text{ (mmolc dm}^{-3}\text{)} = 127,7111 \exp(-0,0051D)$	0,92	0,000			
S- SO4	22	$S-SO4 = 31,7273 \exp(-0,0304D)$	0,85	0,000	$S-SO4 = 10,4428 \exp(-0,0003D)$	0,45	0,040
ARG	13	$ARG \text{ (g kg}^{-1}\text{)} = 188,9486 (1-\exp(-0,0456D))$	0,54	0,011			
	20	$ARG \text{ (g kg}^{-1}\text{)} = 381,4299 (1-\exp(-0,0925D))$	0,60	0,065	$ARG \text{ (g kg}^{-1}\text{)} = 475,4462 \exp(-0,0005D)$	0,94	0,000
	22	$ARG \text{ (g kg}^{-1}\text{)} = 563,1328 \exp(-0,0005D)$	0,83	0,001			
	30	$ARG \text{ (g kg}^{-1}\text{)} = 743,1329 \exp(-0,0005D)$	0,89	0,001			
SLT	13	$SLT \text{ (g kg}^{-1}\text{)} = 265,5157 \exp(-0,0002D)$	0,57	0,007			

Em que: Modelos locais e globais apresentados na tabela foram aqueles que apresentaram ajustes das equações independentemente do nível de p-valor.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Foram identificados através da análise de componentes principais (PCA) que as variáveis-chave PTSR (contribuição relativa nas variâncias = 0,1484) e AOS (contribuição relativa nas variâncias = 0,1389) possuiriam maior possibilidade de explicar as variações no acúmulo de nutrientes dos sítios do TECHS. Bem como que as variáveis suplementares da análise de componentes principais TSP –K (contribuição relativa nas variâncias = 0,1613), TSP – P (contribuição relativa nas variâncias = 0,1573), TSP B (contribuição relativa nas variâncias = 0,1335) foram as variáveis que mais contribuíram com variância global do conjunto de dados (Figura 16 A e B). Nota-se que dentro da função principal dos atributos do solo avaliado, os pesos totais dos atributos de solos são de 100%, como mostra a Figura 16 B.

Figura 16 - Análise dos componentes principais das variáveis do Solo, clima e de volume do eucalipto. A) Projeção das variáveis nos fatores 1 e 2. B) Contribuição relativa dos atributos para a variância total. Em que: TSP - K = porcentagem no topo do solo de potássio, TSP - P = porcentagem no topo do solo de fósforo, PTSR = profundidade total do sistema radicular, AOS = anos ocupação do solo, TSP - B = porcentagem no topo do solo de boro, TSP - Ca = porcentagem no topo do solo de cálcio, TSP - MO = porcentagem no topo do solo de matéria orgânica, VCCC = volume comercial com casca, P (mm) = precipitação anual, DEF (mm) = déficit hídrico do solo, ETP = evapotranspiração potencial (mm), Tm °C = temperatura média anual.



A

Atributo	Contribuição relativa na variância		
	Fator 1	Fator 2	Fator 3
TSP - K	0,161329	0,005301	0,024916
TSP - P	0,157354	0,008312	0,030462
PTSR	0,148459	0,013777	0,046270
AOS	0,138962	0,003950	0,104842
TSP - B	0,133555	0,005980	0,117890
TSP - Ca	0,105832	0,004089	0,217533
TSP - M.O.	0,099973	0,027136	0,176168
VCCC	0,027275	0,184668	0,004846
P (mm)	0,019318	0,166099	0,081439
DEF (mm)	0,003913	0,181730	0,092396
ETP	0,003818	0,199010	0,046712
Tm °C	0,000212	0,199946	0,056527

B

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A partir da seleção das variáveis-chave do TSP, prosseguiu-se com a avaliação das equações em função da AOS e da PTSR, onde percebeu-se que os modelos exponenciais crescentes ajustaram bem melhor as variáveis de solos AOS e decrescentes para PTSR (Figura 17).

Em estudos preliminares verificaram-se que as quantidades de nutrientes retiradas do solo mudaram apenas ligeiramente durante a rotação florestal, mas sua disponibilidade no solo foi muito modificada em plantações de *Eucalyptus grandis* no Congo (LACLAU *et al.*, 2003). Várias indicações sugerem que a mineralização a

serrapilheira da floresta desempenha um papel crucial na nutrição dessas plantações, sendo: (1) as árvores desenvolvem um tapete ou uma manta de raízes densas acima do solo mineral, aderentes a fragmentos em decomposição do solo da floresta (LACLAU *et al.*, 2001a); (2) a distribuição de raízes finas é geralmente concentrada no solo superior no final da rotação (BOUILLET *et al.*, 2002); (3) mudanças na química das soluções durante a sua transferência através do solo da floresta e os horizontes do solo mostram que os nutrientes são absorvidos muito rapidamente pela vegetação, no solo da floresta e no solo superior, e perdas de nutrientes por drenagem profunda no solo ao fim da rotação são muito baixas (LACLAU, 2001b); e (4) os efeitos marcantes do manejo de corte no crescimento das árvores e no conteúdo de nutrientes em plantações jovens de eucalipto foram demonstrados em um experimento de campo conduzido por Nzila *et al.* (2002). Um padrão semelhante foi observado em algumas florestas tropicais da Amazônia, onde a maior parte da biomassa das raízes finas está acima do solo mineral, em uma camada de húmus e detritos. Pode-se acrescentar ainda um estudo radioisótopo (^{32}P) mostrou que o P foi transferido das folhas para raízes vivas através de hifas fúngicas (HERRERA *et al.*, 1978).

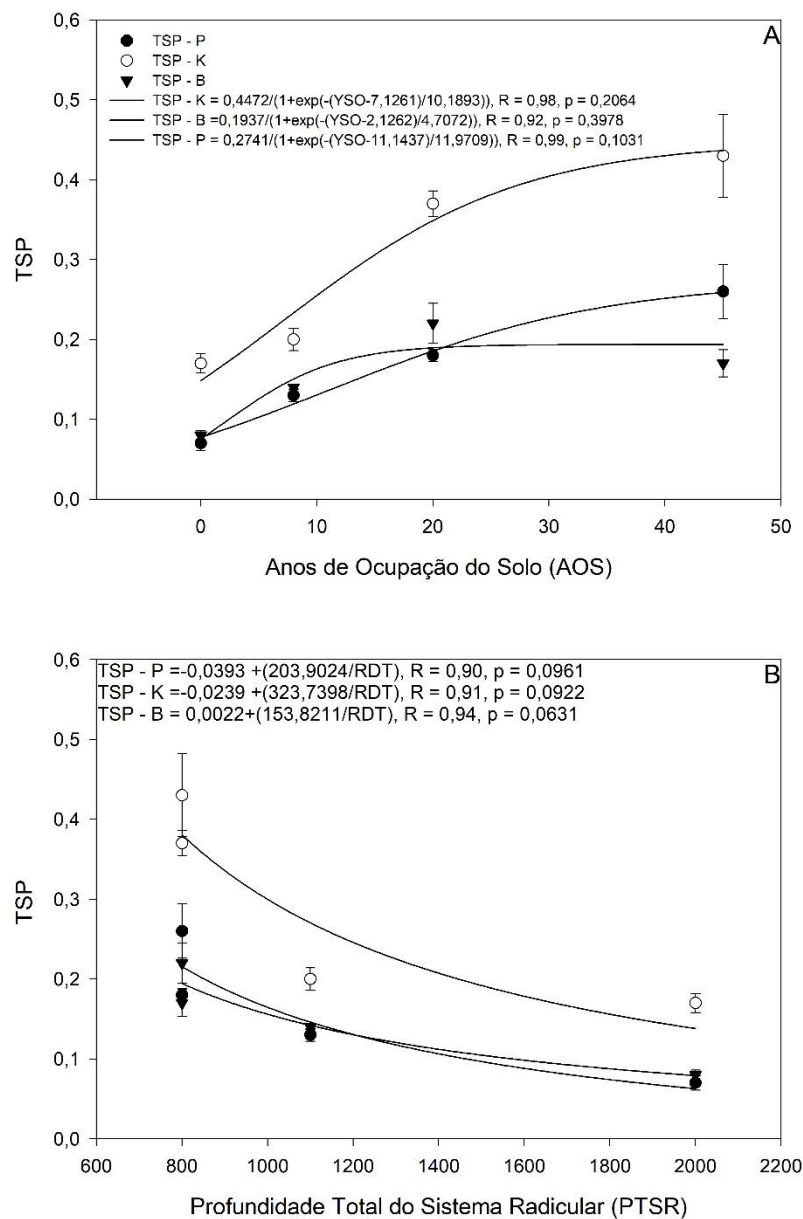
Estas afirmações confirmam os resultados obtidos neste estudo em que com o aumento de AOS aumenta de forma exponencial o TSP (Figura 17). Suponhamos que a absorção de nutrientes pelas plantas ocorre em maior profundidade e que nutrientes retornar ao solo através do litter, um aumento líquido deve ser esperado como resultado da ciclagem de nutrientes. Se a magnitude da elevação da planta for grande comparado a outros processos como lixiviação, elementos fortemente ciclados terão menor profundidade vertical distribuição do que os menos ciclados, e no caso das plantações florestais, os ciclos se repetem ao longo de vários anos, além do que as adubações geralmente ocorrem na superfície do solo. Isto confirma o que chamamos de "hipótese da elevação dos nutrientes" (JOBÁGY; JACKSON 2001), muito favorecido em plantações de eucalipto.

A dinâmica e proporção de STP em relação à rotação do estande comparada com os estoques disponíveis no solo, mostra claramente que a fertilidade do solo nessas plantações de árvores é um parâmetro dinâmico, ou seja: os requisitos atuais de estande são principalmente fornecidos por pequenas quantidades de nutrientes que circulam rapidamente no ecossistema. Ainda temos que com o aumento da

profundidade do sistema radicular influencia negativamente a acumulação dos nutrientes no perfil do solo.

Um dos motivos para este fato ter ocorrido deve ter sido pelo fato da baixa fertilidade observada no SS em relação ao TS, conforme apresentados na Tabela 9. Neste sentido, as raízes exploram um perfil mais profundo, porém com uma fertilidade do solo proporcionalmente menor que as plantações florestais com sistemas radiculares mais rasos. Esta relação foi vista anteriormente, entretanto os autores encontraram comportamento inverso em relação ao Na (JOBÁGY; JACKSON 2001).

Figura 17 - A) Anos de ocupação do solo antes da implementação do experimento de acordo com a contribuição relativa de nutrientes no topo do solo para fósforo, potássio e boro (variando de 0 a 1); B) profundidade total do sistema radicular (PTSR) de acordo com a contribuição relativa de nutrientes no topo do solo para fósforo, potássio e boro (variando de 0 a 1). Em que: AOS = anos ocupação do solo pela plantação florestal, TSP - P = percentagem de fósforo no topo do solo, TSP - K = percentagem de potássio no topo do solo, TSP - B = percentagem de boro no topo do solo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.4 CONCLUSÕES

Este estudo mostra uma exploração muito profunda do solo por raízes finas até uma profundidade de 20 m nas plantações de *Eucalyptus* no Brasil.

A distribuição vertical mostra claramente que os nutrientes concentram-se na superfície do solo, porém existe uma fertilidade do solo profunda que muitas vezes não são consideradas nas amostragens operacionais nos sistemas de recomendação de adubação das empresas florestais brasileiras, bem como não são descritas nos principais manuais de agricultura e de recomendação de adubação brasileiros.

Ainda sobre a distribuição vertical, pode ser verificado que com o aumento do número de rotações e anos de ocupação dos solos com as plantações florestais, ocorre a "hipótese da elevação dos nutrientes (P, K, B)", conforme já sugerido por outros autores. Por outro lado, com o aumento da profundidade do sistema radicular verificou-se uma redução do estoque dos nutrientes na superfície dos solos.

Estudos para verificar a absorção potencial das raízes profundas pode mostrar a grande contribuição do suprimento dos nutrientes das camadas profundas do solo.

REFERÊNCIAS

- ABREU, C. A.; ABREU, M. F.; RAIJ, B. van.; SANTOS, W. R. Comparação de métodos de análise para avaliar a disponibilidade de metais pesados em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, p. 463-468, 1995.
- ALMEIDA, C. A.; SANDS, P. J. Improving the ability of 3-PG to model the water balance of forest plantations in contrasting environments. **Ecohydrology**, Waterloo, v. 9, n. 4, p. 610-630, 2015.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Garmisch-Partenkirchen, v. 22, p. 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- ALVES, F. F. **Seca de ponteiros e crescimento de clones de eucalipto em diferentes doses de adubação**. 2011. 56 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- ANDERSON, D. W. The effect of parent material and soil development on nutrient cycling in temperate ecosystems. **Biogeochemistry**, Bergen, v. 5, p. 71-97, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11941-02**: determinação da densidade básica em madeira. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- BAKKER, M. R.; AUGUSTO, L.; ACHAT, D. L. Fine root distribution of trees and understory in mature stands of maritime pine (*Pinus pinaster*) on dry and humid sites. **Plant Soil**, East Leasing, v. 286, p. 37-51, 2006.
- BARBIN, D. **Planejamento e análise estatística de experimentos agrônômicos**. Arapongas: Midas, 2003. 208 p.
- BARBOSA, V. C.; BREITSCHAFT, A. M. S. Um aparato experimental para o estudo do princípio de Arquimedes. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 115-122, 2006.
- BARBOSA, C. E. M.; FERRARI, S.; CARVALHO, M. P.; PICOLI, P.R.F.; CAVALLINI, M. C.; BENETT, C. G. S.; SANTOS, D. M. A. Inter-relação da produtividade de madeira do pinus com atributos físico-químicos de um latossolo do cerrado brasileiro. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 25-35, 2012.
- BATTIE-LACLAU, P.; LACLAU, J.-P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 114, p. 351-360, 2009. doi: 10.1016/j.fcr.2009.09.004.
- BILLINGS, W.D. The environmental complex in relation to plant growth and distribution. **The Quarterly Review. Biology**, Chicago, v. 27, p. 251-261, 1952.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O.C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R.L.; CEGATTA, Í.; STAPE, J.L. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal Eucalyptus

plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 405, p. 271–283, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>.

BINOTI, M. L. M. S. **Redes neurais artificiais para prognose da produção de povoamentos não desbastados de eucalipto**. 2010. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

BOOTH, T. H. Eucalypt plantations and climate change. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 28-34, 2013.

BOUILLET, J. P.; LACLAU, J. P.; ARNAUD, M.; THONGO, A. Changes with age in the spatial localization of roots of Eucalyptus clone in Congo. Impact on water and nutrient uptake. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 171, p. 43–57, 2002.

BULLINÁRIA, J. A. **Introduction to neural computation**. Notas de aula. 2011. Disponível em: <http://www.cs.bham.ac.uk/~jxb/inc.html>. Acesso em: 8 nov. 2011.

CABRAL, O. M. R.; ROCHA, H. R.; GASH, J. H. C.; LIGO, M. A. V.; FREITAS, H. C.; TATSCH, J. D. The energy and water balance of a Eucalyptus plantation in southeast Brazil. **Journal Hydrology**, New Delhi, v. 388, p. 208–216, 2010. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.04.041

CANHAM, C. **The response of *Banksia* roots to change in water table level in a mediterranean-type environment**. 2011. 135 f. Doctorate (Ph.D. thesis) - Edith Cowan University, Australia, 2011.

CAMPOE, O. C.; STAPE, J. L.; LACLAU, J. P.; MARSDEN, C.; NOUVELLON, Y. Stand-level patterns of carbon fluxes and partitioning in a *Eucalyptus grandis* plantation across a gradient of productivity, in Sao Paulo state, Brazil. **Tree Physiology**, Oxford, v. 32, p. 696-706, 2012.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA - CEPEA. **Informativo Setor Florestal**, nº 192, 2017.

CHRISTINA, M.; LACLAU, J. P.; GONÇALVES, J. L. M.; JOURDAN, C.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J. P. Almost symmetrical vertical growth rates above and below ground in one of the world's most productive forests. **Ecosphere**, Tucson, v. 2, art 27, 2011. DOI: 10.1890/ES10-00158.1

CHRISTINA, M.; NOUVELLON, Y.; LACLAU, J. P.; STAPE, J. L.; BOUILLET, J. P.; LAMBAIS, G. R.; LE MAIRE, G. Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. **Functional Ecology**, London, v. 31, p. 509-519, 2017. DOI: 10.1111/1365-2435.12727

COELHO, L. S.; SILVA, W. V.; PROTIL, R. M. Previsão não-linear dos preços de troncos de eucalipto baseada em uma abordagem neuroevolutiva. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 14, n. 1, p. 139-154, jan./ abr. 2007.

CORRÊA, A. R.; MONTANARI, R.; LAURA, V.A.; MELOTTO, A. M.; SILVA, E. N. S.; PELLIN, D. M. P.; SANTOS, A. S. Aspects of the Silvopastoral System Correlated with Properties of a Typic Quartzipsamment (Entisol) in Mato Grosso do Sul, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 438-447, 2015. <https://dx.doi.org/10.1590/01000683rbcs20130691>.

COSTA, M. S.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Comportamento dos diferentes métodos de determinação da evapotranspiração de referência nas cinco Regiões Brasileiras. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 9, n. 5, p. 310-319, 2015.

DARDANELLI, J. L.; BACHMEIER, O. A.; SERENO, R.; GIL, R. Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam Haplustoll. **Field Crops Research**, California, v. 54, p. 29–38, 1997. DOI: 10.1016/S0378-4290(97)00017-8

DARUNSONTAYA, T.; SUDDHIPRAKARN, A.; KHEORUENROMNE, I.; PRAKONGKEP, N.; GILKES, R. J. The forms and availability to plants of soil potassium as related to mineralogy for upland Oxisols and Ultisols from Thailand. **Geoderma**, Amsterdam, v. 170, p. 11-24, 2012.

DYE, P. Response of *Eucalyptus grandis* trees to soil water deficits. **Tree Physiology**, Oxford, v. 16, p. 233–238, 1996. DOI: 10.1093/treephys/16.1-2.233

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa - Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

FARIA, G. E.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R. Características químicas do solo em diferentes distâncias do tronco de eucalipto e em diferentes profundidades. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 799-810, 2009.

FERCHAUD, F.; VITTE, G.; BORNET, F.; STRULLU, L.; MARY, B. Soil water uptake and root distribution of different perennial and annual bioenergy crops. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 388, p. 307–322, 2015.

FERRAZ, S. F. B.; LIMA, W. D.; RODRIGUES, C. B. Managing forest plantation landscapes for water conservation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 58–66, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.015>. Acesso em: 15 abr. 2019.

FIGUEIREDO, M. G. **Retorno econômico dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) na citricultura paulista**. 2008. 154 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

FLORES, T. B.; ALVARES, C. A.; SOUZA, V. C.; STAPE, J. L. ***Eucalyptus no Brasil***: zoneamento climático e guia para identificação. Piracicaba: IPEF, 2016. 448 p.

FREITAS, T. A. S.; BARROSO, D. G.; CARNEIRO, J. G. A. Dinâmica de raízes de espécies arbóreas: visão da literatura. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 1, p. 133-142, 2008.

FREITAS, L.; OLIVEIRA, I. A.; CASAGRANDE, J. C.; SILVA, L. S.; CAMPOS, M. C. C. Estoque de carbono de latossolos em sistemas de manejo natural e alterado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 228-239, 2018. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.5902/1980509831575>. Acesso em: 15 abr. 2019.

FREYCON, V.; WONKAM, C.; FAYOLLE, A.; LACLAU, J. P.; LUCOT, E.; JOURDAN, C. Tree roots can penetrate deeply in African semi-deciduous rain forests: evidence from two common soil types. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v. 31, n. 1, p. 13-23, 2015.

GAVA, J. L. Efeito da adubação potássica em plantios de *E. grandis* conduzidos em segunda rotação em solos com diferentes teores de potássio trocável. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 11, n. 30, p. 89-94, 1997. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/stecnica/nr30/cap8.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2017.

GIANOLA, D.; VAN KAAM, J. B. C. H. M. Reproducing kernel hilbert spaces regression methods for genomic assisted prediction of quantitative traits. **Genetics**, Boulder, v. 178, n. 4, p. 2289–2303, 2008.

GIANOLA, D.; CAMPOS, G. de los. Inferring genetic values for quantitative traits non-parametrically. **Genetic Research**, Paris, v. 90, n. 6, p. 525-540, 2009.

GONÇALVES, J. L. M. Sistema radicular de absorção do *Eucalyptus grandis* sob diferentes condições edáficas. **Silvicultura**, São Paulo, v. 17, n. 61, p. 8-10, mar./abr. 1995.

GONÇALVES, J. L. M. ; ALVARES, C. A.; GONÇALVES, T. D.; MOREIRA, R. M.; MENDES, J. C. T.; GAVA, J. L. Mapeamento de solos e da produtividade de plantações de *Eucalyptus grandis* em Itatinga, SP, com uso de sistema de informação geográfica. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 94, p. 187–201, 2012.

GREGORY, P. J. Roots, rhizosphere and soil: the route to a better understanding of soil science? **European Journal of Soil Science**, London, v. 57, p. 2–12, 2006. DOI:10.1111/j.1365-2389.2005.00778.x

HABIER, D.; FERNANDO, R. L.; DEKKERS, J. C. M. The impact of genetic relationship on genome-assisted breeding values. **Genetics**, Boulder, v. 117, p. 2389- 2397, 2007. DOI: 10.1534/genetics.107.081190

HABIER, D.; FERNANDO, R. L.; KIZILKAYA, K.; GARRICK, D. J. Extension of the Bayesian alphabet for genomic selection. In: WORLD CONGRESS ON GENETICS APPLIED TO LIVESTOCK PRODUCTION, 9, 2010, Leipzig, Germany.

[**Proceedings...**]. [S.l.: s.n.], 2010. Disponível em: <http://www.kongressband.de/wcgalp2010/assets/pdf/0468.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2010.

HAKAMADA, R.; HUBBARD, R. M.; FERRAZ, S.; STAPE, J. L.; LEMOS, C.; Biomass production and potential water stress increase with planting density in four highly productive clonal Eucalyptus genotypes. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, Grahamstown, v. 79, n. 3, p. 251-257, 2017. DOI: 10.2989/20702620.2016.1256041

HERRERA, R.; MERIDA, T.; STARK, N.; JORDAN, C. F. Direct phosphorus transfer from leaf litter to roots. **Naturwissenschaften**, Berlim, v. 65, p. 208–209, 1978.

HUANG, B.; DUNCAN, R. R.; CARROW, R. N. Drought-resistance mechanisms of seven warm-season turfgrasses under surface soil drying: II. Root aspects. **Crop Science**, Madison, v. 37, p. 1863–1869, 1997.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório 2015**. 2015. Disponível em: http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf. Acesso em: 08 abr. 2018.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório 2017**. 2017. Disponível em: http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf. Acesso em: 06 dez. 2017.

JANSSENS, I. A.; SAMPSON, D. A.; CURIEL-YUSTE, J.; CARRARA, A.; CEULEMANS, R. The carbon cost of root turnover in a Scots pine forest. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 168, p. 231-240, 2002.

JESUS, G. L.de; SILVA, I. R.; ALMEIDA, L. F. J.; DOS SANTOS, M. A.; LEITE, F. P.; NEVES, J. C. L. Eucalyptus productivity, soil physical properties and organic matter fractions influenced by traffic intensity and harvest residues. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 1190–1203, 2015.

JOBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. The distribution of soil nutrients with depth: global patterns and the imprint of plants. **Biogeochemistry**, Bergen, v. 53, p. 51–77, 2001.

KING, J.; GAY, A.; SYLVESTER-BRADLEY, R.; BINGHAM, I.; FOULKES, J.; GREGORY, P.; ROBINSON, D. Modelling cereal root systems for water and nitrogen capture: towards an economic optimum. **Annals Botany**, Oxford, v. 91, p. 383–390, 2003. DOI:10.1093/aob/mcg033

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Koppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, Garmisch-Partenkirchen, v. 15, p. 259–263, 2006.

KREJCI, L. C.; MARTINS, L. G. C.; LOURENÇO, P. Y. **Desenvolvimento do sistema radicular de Eucalyptus sp sob diferentes condições de solo**. Salvador: COPENER, 1986. 24 p.

KONÔPKA, B.; NOGUCHI, K.; SAKATA, T.; TAKAHASHI, M.; KONÔPKOVÁ, Z. Fine root dynamics in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantation throughout the growing season. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 225, p. 278-286, 2006.

KOPPEN, W. Das geographische System der Klimate. In: KOPPEN, W.; GEIGER, G. (Ed.). **Handbuch der Klimatologie, Teil C**. Berlin: Gebruder Bornträger, p. 1-44. 1936.

LACLAU, J. P.; ARNAUD, M.; BOUILLET, J. P.; RANGER, J. Spatial distribution of Eucalyptus roots in a deep sandy soil in the Congo: relationships with the ability of the stand to take up water and nutrients. **Tree Physiology**, Oxford, v. 21, p. 129–136, 2001a.

LACLAU, J. P.; BOUILLET, J.-P.; RANGER, J.; JOFFRE, R.; GOUMA, R.; SAYA, A. Dynamics of nutrient translocation in stemwood across an age series of Eucalyptus hybrid. **Annals of Botany**, Oxford, v. 88, p. 1079–1092, 2001b.

LACLAU, J. P.; DELEPORTE, P.; RANGER, J.; BOUILLET, J.-P.; KAZOTTI, G. Nutrient dynamics throughout the rotation of *Eucalyptus* clonal stands in Congo **Annals of Botany**, Oxford, v. 91, n. 7, p. 879-892, 2003. DOI: 10.1093/aob/mcg093

LACLAU, J. P.; TOUTAIN, F.; M'BOU, A. T.; ARNAUD, M.; JOFFRE, R.; RANGER, J. The function of the superficial root mat in the biogeochemical cycles of nutrients in Congolese Eucalyptus plantations. **Annals of Botany**, Oxford, v. 93, p. 249-261, 2004.

LACLAU, J. P.; SILVA, E. A. da, RODRIGUES LAMBAIS, G., BERNOUX, M., LE MAIRE, G.; STAPE, J. L., NOUVELLON, Y. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in *Eucalyptus grandis* plantations. **Frontiers in Plant Science**, Melbourne, v. 4, 243, 2013. <http://doi.org/10.3389/fpls.2013.00243>

LAFETÁ, B. O.; SANTANA, R. C.; NOGUEIRA, G. S.; NEVES, J. C. L.; PENIDO, T. M. A. Eficiência de utilização de macronutrientes em eucalipto por método não destrutivo estimados por redes neurais artificiais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 613-623, 2018. <https://dx.doi.org/10.5902/1980509832049>

MEUWISSEN, T. H. E.; HAYES, B. J.; GODDARD, M. E. Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps. **Genetics**, Boulder, v. 157, p. 1819-1829, 2001.

MEUWISSEN, T. H. E.; SOLBERG, T. R.; SHEPHERD, R.; WOOLLIAMS, J. A. A fast algorithm for BayesB type of prediction of genome-wide estimates of genetic value. **Genetics Selection Evolution**, Paris, v. 41, n. 2, 10 p. 2009. Disponível em: <https://gsejournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/1297-9686-41-2>. Acesso em: 15 abr. 2019.

MISRA, R. K. Root and shoot elongation of rhizotron-grown seedlings of *Eucalyptus nitens* and *Eucalyptus globulus* in relation to temperature. **Plant Soil**, East Leasing, v. 206, p. 37–46, 1999. DOI: 10.1023/A:1004337121719

NICKELL, S. **The performance of companies**. Oxford: Basil Blackwell, 1995. 17 p.

NZILA, J. D.; BOUILLET, J. P.; LACLAU, J. P.; RANGER, J. Slash management effects on the tree growth and nutrient cycling in young *Eucalyptus* replanted sites in the Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 171, p. 209–221, 2002.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. 1017 p.

PADILLA, F. M.; PUGNAIRE, F. I. Rooting depth and soil moisture control Mediterranean woody seedling survival during drought. **Functional Ecology**, London, v. 21, p. 489–495, 2007.

PAZ, H. Root/shoot allocation and root architecture in seedlings: variation among forest sites, microhabitats, and ecological groups 1. **Biotropica**, Oxford, v. 35, p. 318–332, 2003.

PEEL, M.C., FINLAAOSN, B.L.; MCMAHON, T.A. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. – Hydrol. **Earth System Science**, New Delhi, v. 11, p. 1633–1644, 2007.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**: Exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: Fealq, 2002. 309 p.

PINTO, S. I. C.; FURTINI NETO, A. E.; NEVES, J. C. L.; FAQUIN, V.; MORETTI, B. S. Eficiência nutricional de clones de eucalipto na fase de mudas cultivados em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 523–533, 2011.

POORTER, H.; NIINEMETS, U.; POORTER, L.; WRIGHT, I. J.; VILLAR, R. Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta-analysis. **New Phytologist**, Oxford, v. 182, p. 565–588, 2009.

PRADIER, C.; HINSINGER, P.; LACLAU, J. P.; BOUILLET, J. P.; GUERRINI, I. A.; GONÇALVES, J. L. M.; ASENSIO, V.; ABREU-JUNIOR, C. H.; JOURDAN, C. Rainfall reduction impacts rhizosphere biogeochemistry in eucalypts grown in a deep Ferralsol in Brazil. **Plant Soil**, East Leasing, v. 414, p. 339–354, 2017. DOI: 10.1007/s11104-016-3107-7

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargil, 1987. 170 p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 1996. 285 p. Boletim técnico-100.

RAMOS, M. R.; GUIZZO, J. V. M.; LIMA, L. F. A.; SANTOS, D. M. A.; UHLMANN, A. Potencial de uso dos solos da fazenda agroecológica de Palmas – TO. **Cultura Agronômica**, Ilha Solteira, v. 27, n. 3, p. 366-377, 2018.

RESENDE, M. D. V.; RESENDE JÚNIOR,, M. F. R.; AGUIAR, A. M.; ABAD, J. I. M.; MISSIAGGIA, A. A.; SANSALONI, C.; PETROLI, C.; GRATTAPAGLIA, D. **Computação da seleção genômica ampla (GWS)**. Colombo: Embrapa Florestas, 2010. 79 p. Série Documentos, 210.

RIBEIRO, C. A.; GUIMARÃES, P. T. G.; VENEGAS, V. H. A. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999. 359 p.

RICHTER, D. D.; MARKEWITZ D. How deep is soil? **BioScience**, Whashington, v. 45, p. 600–609, 1995.

ROBERTSON, M. J.; FUKAI, S.; LUDLOW, M. M.; HAMMER, G. L. Water extraction by grain-sorghum in a subhumid environment.1. Analysis of the water extraction pattern. **Field Crop Research**, California, v. 33, p. 81–97, 1993. DOI:10.1016/0378-4290(93)90095-5

ROCHA, S. M. G. **Densidade básica da madeira de eucalipto em gradientes climáticos no Brasil**. 2017. 48 F. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Gerônimo Monteiro, 2017.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL™ para os cálculos de balanços hídricos: normal, seqüencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, p. 133-137, 1998.

RÖMHELD, V.; KIKBY, E. A. Research on potassium in agriculture: needs and prospects. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 335, p. 155-158, 2010.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; LEITE, H. G.; COMERFORD, N. B.; NOVAIS, R. F. Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 697-706, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rarv/v32n4/a11v32n4.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2017.

SANTIAGO, L. S.; GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F. C.; FISHER, J. B.; MACHADO, K.; WOODRUFF, D. Scale of photosynthetic characteristics of leaves with hydraulic conductivity and wood density in canopy trees of the Panamanian forest. **Oecologia**, Austrália, v. 140, n. 4, p. 543-550, 2004.

SANTOS, J. C. P. O cultivo de eucalipto como alternativa de renda aos produtores da Região Sul de Mato Grosso do Sul. In: ENCONTRO CIENTÍFICO DE

ADMINISTRAÇÃO, ECONOMIA E CONTABILIDADE, 1, 2011, Ponta Porã. **Anais** [...]. Dourados: UEMS, 2011a. p. 1-12.

SANTOS, H.G.; CARVALHO JÚNIOR, W.; DART, R.O.; ÁGLIO, M.L.D.; SOUZA, J.S.; PARES, J.G.; FONTANA, A.; MARTINS, A.L.S.; OLIVEIRA, A.P. **O novo mapa de solos do Brasil**: legenda atualizada. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011b. 67 p. Documentos/Embrapa Solos, 130.

SAYER, E. J.; TANNER, E. V. J.; CHEESMAN, A. W. Increased litterfall changes fine root distribution in a moist tropical forest. **Plant Soil**, East Lansing, v. 281, p. 5-13, 2006.

SCARDUA, J. E. R. **Modelagem multicamada do balanço hídrico para plantios de eucalipto em diferentes estágios de desenvolvimento**. 2014. 66 F. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

SCOLFORO, H. F.; MCTAGUE, J. P.; BURKHART, H.; ROISE, J.; CAMPOE, O.; STAPE, J. L. Yield pattern of eucalypt clones across tropical Brazil: an approach to clonal grouping. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 432, p. 30-39, 2019a. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.08.051

SCOLFORO, H. F.; MCTAGUE, J. P.; BURKHART, H.; ROISE, J.; CAMPOE, O.; STAPE, J. L. Eucalyptus growth and yield system: linking individual-tree and stand-level growth models in clonal eucalypt plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 432, p. 1-16, 2019b. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.045>

SILVA, V. E.; HERNANDEZ, F. B. T. Perspectivas para a silvicultura irrigada. **Unespciência**, Botucatu, 2015. Disponível em: <http://unespciencia.com.br/2015/10/01/perspectivas-para-a-silvicultura-irrigada/>. Acesso em: 15 abr. 2019.

SOLBERG, T. R.; SONESSON, A. K.; WOOLLIAMS, J. A.; MEUWISSEN, T. H. E. Reducing dimensionality for prediction of genome-wide breeding values. **Genetics Selections Evolution**, Paris, v. 41, n. 29, 2009.

SOUZA, M. J. H.; RIBEIRO, A.; LEITE, H. G.; LEITE, F. P. MINUZZI, R. B. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em três regiões da Bacia do Rio Doce. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, p. 399-410, 2006.

SOUZA, F. M. L.; de PUPO, C. H.; SEREGHETTI, G. C.; SANSÍGOLO, C. A.; FERREIRA, J. P.; SILVA, R. B.; GARCIA, D. P. Características de crescimento, densidade básica e composição química da madeira de *Eucalyptus Spp.* na Região de Ribas do Rio Pardo – MS. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, Tupã, v. 11, n. 4, p. 350-359, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2017v11n4p350-359>. Acesso em: 15 abr. 2019.

STALLARD, R. F. Tectonic processes, continental freeboard, and the rate-controlling step of continental denudation. *In*: BUTCHER, S. S. ; CHARLSON, R. J. ;ORIAN, S.

G. H. ; WOLFE, G. V. (ed.). **Global biogeochemical cycles**. Chicago: Academic Press, 1992. p. 93–122.

STAPE, J. L.; RYAN, M. G.; BINKLEY, D. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis* X *urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 219–234, 2004. Disponível em: https://www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_2004_stape001.pdf. Acesso em: 15 abr. 2019.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI E. N.; SILVA, C. R.; SILVA, S. R.; HAKAMADA, R. E.; FERREIRA, J. M. A.; LIMA, A. M. N.; GAVA, J. L.; LEITE, F. P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J. M.; SILVA, G. G. C.; AZEVEDO, M. R. The Brazil eucalyptus potential productivity project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1684 – 1694, 2010.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; GRATTAPAGLIA, D.; CAMPOE, O.; ALVARES, C.; GOMES, F.; MATTOS, E.; OTTO, M.; HAKAMADA, R.; MORAES, M. T. Fatores hídricos e as decisões de silvicultura, de melhoramento e de proteção na eucaliptocultura. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 3, 2014, Campinas. **Anais** [...]. Curitiba: Embrapa Florestas, 2014. p. 81-98.

STATSOFT. **Statistica** (data analysis software system), version 7. [2007].

STAVE, J.; OBA, G.; ERIKSEN, A. B.; NORDAL, I.; STENSETH, N. C. Seedling growth of *Acacia tortilis* and *Faidherbia albida* in response to simulated groundwater tables. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 212, p. 367–375, 2005.

STONE, E. L.; KALISZ, P. J. On the maximum extent of tree roots. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 46, p. 59–102, 1991.

STONE, L. R.; GOODRUM, D. E.; JAAFAR, M. N.; KHAN, A. H. Rooting front and water depletion depths in grain sorghum and sunflower. **Agronomy Journal**, Sacramento, v. 93, p. 1105–1110, 2001. DOI: 10.2134/agronj2001.9351105x

THONGO M'BOU, A.; JOURDAN, C.; DELEPORTE, P.; NOUVELLON, Y.; SAINTANDRÉ, L.; BOUILLET, J. P. *et al.* Root elongation in tropical *Eucalyptus* plantations: effect of soil water content. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 65, p. 609, 2008.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and water balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1957. 311 p. (Drexel Institute of Technology. Publications in Climatology, v. 10, n. 3).

TRUDGILL, S. T. **Soil and vegetation systems**. New York: Oxford University Press, 1988.

TÜCKMANTEL, T.; LEUSCHNER, C.; PREUSSER, S.; KANDELER, E.; ANGST, G.; MUELLER, C. W.; MEIER, I. C. Root exudation patterns in a beech forest: dependence on soil depth, root morphology, and environment. **Soil Biology and Biochemistry**, Arlington, v. 107, p. 188-197, 2017. Disponível em: <https://kundoc.com/pdf-root-exudation-patterns-in-a-beech-forest-dependence-on-soil-depth-root-morpholo.html>. Acesso em: 15 abr. 2019.

USMAN, S.; SINGH, S. P.; RAWAT, Y. S. Fine root productivity and turnover in two Evergreen Central Himalayan forest. **Annals of Botany**, Oxford, v. 84, p. 87-94, 1999.

VOGT, K.; ASBJORNSEN, H.; ERCELAWN, A.; MONTAGNINI, F.; VALDÉS, M. Roots and mycorrhizas in plantation ecosystems. In: NAMBIAR, E. K. S.; BROWN, A. G. (eds.). **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Canberra: ACIAR, 1997. p. 247-296.

VOLK, T. **Gaia's body**. New York: Copernicus, 1998.

WITSCHORECK, R.; SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M. V. W. Estimativa da biomassa e do comprimento de raízes finas em *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake no município de Santa Maria - RS. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 177-183, 2003.

ZHANG, X.; PEI, D.; CHEN, S. Root growth and soil water utilization of winter wheat in the North China Plain. **Hydrology Processes**, Oxford, v. 18, p. 2275–2287, 2004. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/hyp.5533>. Acesso em: 15 abr. 2019.

AGRADECIMENTOS

O Projeto TECHS dependeu das contribuições de mais de 150 pessoas de 26 empresas, e agradecemos a todos por suas contribuições para o Projeto. O projeto foi financiado por 26 empresas, com um pesquisador principal: Anglo American (Andre Machado), Arauco (Rodrigo Coutinho), Arborgem (Gabriela Bassa), ArcelorMittal (Roosevelt Almado), Cenibra (Fernando Leite), CMPC (Elias Araujo), Comigo (Ubirajara Oliveira), Copener (Jacyr Alves), Duratex (Raul Chaves), Eldorado (Vinicius Silva), Fazenda Campo Bom (Jacqueline Pirez), Fibria (Rodolfo Loos), Florestal Itaquari (Admir Mora), Florestal Oriental (Ricardo Methol), Gerdau (Francisco Gomes), GMR (Paulo Leite), International Paper (Cristiane Lemos), Jari (Katia Silva), Klabin (James Stahl), Lwarcel (Marcela Capoani), Montes del Plata (Alejandro Gonzalez), Plantar (David Fernandes), Rigesa (Ricardo Paim), Suzano (Luiz Fabiano), Vallourec (Helder Andrade) e Veracel (Helton Lourenço). Foi providenciada assistência fundamental para vários aspectos do projeto de Luiz Barrichelo, Dario Grattaplagia, Mike Ryan, Eduardo Mattos, Robert Hubbard, Rodrigo Hakamada, Aurelio Aguiar, Leandro de Siqueira, Gleison dos Santos e João Flavio Silva. O projeto também recebeu apoio dessas universidades e institutos: Universidade de São Paulo - Brasil, Universidade Estadual de São Paulo - Brasil, Universidade Federal de Lavras - Brasil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Brasil, Colorado State University - EUA, Universidade do Estado da Carolina do Norte - EUA, USDA Forest Service, CNPq - Brasil e Fapesp - Brasil.

ANEXOS

Tabela 6 – Coeficientes das equações lineares geradas pela regressão ridge para a estimação da variável resposta CAD (mm), AD (mm) aos 3, 9, 24 e 65 meses, IMA, e DB em função dos grupos de variáveis independentes Todas, Solo, Clima ajustadas para os 14 sítios do TECHS no Brasil.

Variáveis Resposta	Grupo de Variáveis Independentes	Interseção	AG	AF	AT	SLT	ARG	DP	DS	PT	AOS	Tm °C	P (mm)	ETP (mm)	P -ETP	ARM	DEF (mm)	EXC (mm)
CAD (mm)	Todas	186,91	-3,74	-109,35	-31,81	420,21	18,26	52,78	61,10	-189,71	-0,11	-3,34	-0,11	-0,02	-0,01	0,02	0,12	0,04
	Solo	-2,32	18,09	-168,11	-39,95	499,17	24,83	61,61	81,11	-235,46	-0,49							
	Clima	357,37											-6,39	-0,14	-0,04	-0,01	0,03	0,20
AD 3 meses (mm)	Todas	16,72	4,74	5,00	3,52	10,90	3,85	5,57	3,65	9,66	0,03	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Solo	-0,21	1,69	-15,70	-3,73	46,61	2,32	5,75	7,57	-21,99	-0,05							
	Clima	33,38											-0,60	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,02
AD 9 meses (mm)	Todas	-3110,16	-0,75	-120,13	-33,68	372,02	23,34	71,74	69,54	-213,63	-0,03	-2,11	-0,11	-0,01	-0,02	0,02	0,12	0,03
	Solo	-0,21	1,69	-15,70	-3,73	46,61	2,32	5,75	7,57	-21,99	-0,05							
	Clima	408,99											-7,31	-0,16	-0,04	-0,01	0,04	0,23
AD 24 meses (mm)	Todas	348,31	-7,02	-203,74	-59,28	782,96	34,06	98,35	113,84	-353,48	-0,21	-6,22	-0,21	-0,04	-0,02	0,03	0,22	0,07
	Solo	-4,24	33,63	-313,19	-74,44	929,87	46,30	114,76	151,12	-438,72	-0,91							
	Clima	665,92											-11,91	-0,26	-0,07	-0,02	0,06	0,37
AD 65 meses (mm)	Todas	559,81	-11,28	-327,46	-95,28	1258,38	54,74	158,08	182,97	-568,12	-0,34	-9,99	-0,34	-0,07	-0,04	0,05	0,35	0,11
	Solo	-6,82	54,06	-503,36	-119,64	1494,50	74,41	184,44	242,88	-705,12	-1,46							
	Clima	1070,28											-19,14	-0,43	-0,11	-0,04	0,10	0,60
IMA	Todas	45,27	-2,22	1,93	-0,30	-62,32	3,92	17,97	-0,38	4,66	-0,31	-0,67	-0,02	-0,02	0,00	0,01	-0,02	-0,01
	Solo	25,90	-13,66	3,18	-4,25	-6,00	5,87	9,56	-9,72	20,79	-0,26							
	Clima	95,95											-0,90	-0,01	-0,01	0,00	0,00	-0,02
DB	Todas	0,4947	0,0130	-0,0225	-0,0014	0,0015	0,0018	-0,0465	0,0032	-0,0183	0,0004	0,0017	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	Solo	0,5749	0,0047	0,0003	0,0019	-0,0741	0,0017	-0,0513	0,0008	-0,0126	0,0005							
	Clima	0,3497											0,0026	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

CAD (mm) = Capacidade Disponível de Água (mm m⁻¹), AD 3 meses (mm) = Absorção de Água Potencial para plantios de 3 meses, AD 9 meses (mm) = Potencial Absorção de Água para plantios de 9 meses de idade, AD 24 meses (mm) = Potencial Absorção de Água para plantios de 24 meses, AD 65 meses (mm) = Potencial Absorção de Água para plantios de 65 meses, IMA = Incremento Médio Anual (m³ ha⁻¹ ano⁻¹), DB = Densidade Básica da Madeira (g cm⁻³), Todas = Todas as variáveis climáticas e do solo, Solo = variáveis do solo utilizadas neste estudo, Clima = variáveis climáticas usadas neste estudo.