

JOSIANA JUSSARA NAZARÉ BASÍLIO

**RAÍZES FINAS EM PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO: EFEITOS GENÉTICOS E
EDAFOCLIMÁTICOS**

Botucatu

2021

JOSIANA JUSSARA NAZARÉ BASÍLIO

**RAÍZES FINAS EM PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO: EFEITOS GENÉTICOS E
EDAFOCLIMÁTICOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Ciência Florestal

Orientador: Otávio Camargo Campoe

Coorientador: Robert Marsh Hubbard

Botucatu

2021

B312r

Basílio, Josiana Jussara Nazaré

Raízes finas em plantações de eucalipto: efeitos genéticos e edafoclimáticos / Josiana Jussara Nazaré Basílio. -- Botucatu, 2021
76 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Otávio Camargo Campoe

Coorientador: Robert Marsh Hubbard

1. Déficit hídrico. 2. Idade de cultivo. 3. Profundidade de enraizamento. 4. Raízes finas. 5. Textura do solo. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: RAÍZES FINAS EM PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO: EFEITOS GENÉTICOS E EDAFOCLIMÁTICOS

AUTORA: JOSIANA JUSSARA NAZARÉ BASÍLIO

ORIENTADOR: OTÁVIO CAMARGO CAMPOE

COORIENTADOR: ROBERTO MARSH HUBBARD

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em CIÊNCIA FLORESTAL, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. OTÁVIO CAMARGO CAMPOE (Participação Virtual)
Ciências Florestais / Universidade Federal de Lavras



Pesquisador Dr. JOANNÈS GUILLEMOT (Participação Virtual)
Ciências Florestais / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz



Pesquisador Dr. TÚLIO BARROSO QUEIROZ (Participação Virtual)
. / Bracell



Botucatu, 29 de abril de 2021

Aos meus amados pais, Manoel José Basílio e Maria Helena Nazaré Basílio, e as minhas queridas irmãs, Maria Jaciara e Juliana por todo amor, carinho e por sempre me apoiarem e acreditarem nos meus sonhos.

Dedico

A minha prima Antônia de Deus Batista (in memoriam) pela grande lição de vida e incentivo nos estudos.

Ofereço

AGRADECIMENTOS

À Deus e a constante proteção de Maria em todos os momentos.

À minha família, principalmente meus pais, Manoel José e Maria Helena pelo amor e dedicação, por não terem medido esforços e suor na conquista deste sonho e pelas constantes orações nos períodos mais difíceis.

Ao meu orientador Otávio Camargo Campoe, que desde o início das atividades junto ao Programa TECHS/IPEF tem me contemplado com seu apoio, confiança e direcionamento nesta caminhada. Por ter confiado a mim um banco de dados tão especial, que no início foi um desafio, mais hoje conseguimos entregar grandes resultados para a silvicultura brasileira.

Ao meu Coorientador Robert Hubbard pelas considerações e sugestões ao longo da construção deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao IPEF pelo apoio financeiro através da concessão de bolsa durante parte da realização do mestrado.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, em especial a Faculdade de Ciências Agrárias pela estrutura e qualidade de ensino oferecida.

Ao Programa TECHS pela disponibilidade do banco de dados de raízes finas para a construção deste trabalho, e a todas as empresas associadas pelo empenho na coleta das amostras, em especial a Vallourec, International Paper, Klabin e Suzano.

Ao Eng. Florestal e grande amigo Tulio Barroso Queiroz, por sua amizade, ensinamentos pessoais e profissionais, seus conselhos foram fundamentais para chegar até aqui.

Ao Osvaldir Feliciano dos Santos pelo apoio e dedicação em todos os momentos, pelo companheirismo, amizade e principalmente paciência nos momentos de dificuldades.

Aos meus colegas e amigos de pós-graduação, Gerardo Rojas, Marina Sbardella, Rhuan e Aline.

Enfim, a todos que, de uma forma ou de outra, colaboraram para a conclusão desta importante etapa na minha vida e que, embora não citados aqui, não deixam de merecer o meu agradecimento mais sincero.

RESUMO

Compreender como as variações climáticas irão impactar a produtividade dos ecossistemas florestais se tornou um grande desafio para os fisiologistas de plantas, os quais tem destinado grandes esforços para entender sua capacidade de adaptação e sobrevivência. Neste contexto, o comportamento das raízes finas ao longo do perfil de solo até a profundidade máxima de enraizamento se torna necessário para melhorar a compreensão das interações solo-planta-atmosfera, assim como as estratégias usadas para sobrevivência aos longos períodos de seca. Este estudo teve como objetivo principal avaliar a distribuição de raízes finas em profundidade para genótipos de *Eucalyptus* cultivados em condições edafoclimáticas contrastantes, com manipulação da disponibilidade hídrica em cada sítio (100% e 70% da disponibilidade hídrica local). Os objetivos específicos foram distribuídos em três capítulos: (i) comparar a distribuição de raízes finas para quatro genótipos de *Eucalyptus* cultivados em clima tropical e subtropical aos três anos após o plantio; (ii) investigar a distribuição de raízes em profundidade para o clone *Eucalyptus* mais plantado no Brasil em quatro condições edafoclimáticas distintas três anos após o plantio e (iii) caracterizar as mudanças ocorridas na distribuição de raízes finas dos três para os seis anos de idade em dois genótipos de *Eucalyptus*. Raízes finas, ou seja, raízes com diâmetro inferior a 2 mm, foram amostradas até a profundidade máxima com auxílio de um trado semi-mecanizado que coletou amostras em três pontos por parcela. Já aos três anos, as raízes finas exploraram grande volume de solo, com massa de raízes finas situando-se entre 3,2 a 9,7 Mg.ha⁻¹. Para esta idade, profundidades de enraizamento situaram-se entre 3 e 11 metros, com cerca de 50% das raízes finas no primeiro 1 metro do solo. Maiores profundidades de enraizamento foram identificadas no sítio subtropical quando comparado ao tropical e os genótipos A1 (*E. urophylla*) e C3 (*E. grandis* x *E. camaldulensis*) apresentaram maiores biomassas de raízes finas quando cultivados em ambientes com presença elevada de déficit hídrico (~580 mm). Aos seis anos o genótipo *E. urophylla* apresentou amplitude de massa de raízes finas de 1,69 a 10,27 Mg.ha⁻¹, no qual metade da massa de raízes finas prevaleceu no primeiro metro de solo e menos de 10% abaixo de cinco metros de profundidade. Raízes finas atingiram profundidade de enraizamento entre 6,9 a 17,7 metros aos seis anos, sendo que a máxima profundidade foi encontrada no sítio com elevados teores de areia no solo. Verificou-se aumento em cerca de 38% na profundidade máxima de enraizamento

para os genótipos A1 e C3 dos três para os seis anos. Já em relação a massa de raízes finas, em ambiente tropical a massa de raízes finas aumentou em 55 % dos três para os seis anos para ambos os genótipos. Comportamento distinto foi observado para o sítio úmido. De maneira geral, os genótipos de *Eucalyptus* apresentaram elevada plasticidade na distribuição de raízes finas em função da disponibilidade hídrica ao longo do gradiente edafoclimáticos dos sítios, através de uma mudança relativa na alocação de carbono abaixo do solo em função da redução da disponibilidade hídrica.

Palavras-chave: Déficit hídrico; Idade de cultivo; Profundidade de enraizamento; Raízes finas; Textura do solo.

ABSTRACT

Understanding how climatic variations will impact the productivity of forest ecosystems has become a major challenge for plant physiologists, who have made great efforts to understand their adaptability and survival. In this context, the behavior of fine roots along the soil profile up to the maximum rooting depth is necessary to improve the understanding of soil-plant-atmosphere interactions, as well as the strategies used to survive long periods of drought. This study aimed to evaluate the distribution of fine roots in depth for *Eucalyptus* genotypes grown under contrasting edaphoclimatic conditions, with manipulation of water availability at each site (100% and 70% of local water availability). The specific objectives were distributed in three chapters: (i) to compare the distribution of fine roots for four genotypes of *Eucalyptus* cultivated in tropical and subtropical climate at three years after planting; (ii) investigate the root distribution in depth for the most planted *Eucalyptus* clone in Brazil in four distinct edaphoclimatic conditions three years after planting and (iii) characterize the changes that occurred in the distribution of fine roots from three to six years of age in two *Eucalyptus* genotypes. Fine roots, that is, roots with a diameter of less than 2 mm, were sampled to maximum depth with the aid of a semi-mechanized auger that collected samples at three points per plot. At the age of three, thin roots explored a large volume of soil, with a mass of fine roots ranging from 3.2 to 9.7 Mg.ha⁻¹. For this age, rooting depths were between 3 and 11 meters, with about 50% of the fine roots in the first 1 meter of the soil. Greater rooting depths were identified in the subtropical site when compared to the tropical one, and genotypes A1 (*E. urophylla*) and C3 (*E. grandis* x *E. camaldulensis*) showed higher biomass of thin roots when grown in environments with high water deficit (~ 580 mm). At six years old, the *E. urophylla* genotype showed a range of fine root masses from 1.69 to 10.27 Mg.ha⁻¹, in which half of the mass of fine roots prevailed in the first meter of soil and less than 10% below five meters deep. Thin roots reached rooting depths between 6.9 to 17.7 meters at the age of six, and the maximum depth was found in the site with high levels of sand in the soil. There was an increase of about 38% in the maximum rooting depth for genotypes A1 and C3 from three to six years. Regarding the weight of fine roots, in a tropical environment the weight of fine roots increased by 55% from three to six years for both genotypes. Different behavior was observed for the wet site. In general, *Eucalyptus* genotypes showed high plasticity in the distribution of fine roots due to water availability

along the edaphoclimatic gradient of the sites, through a relative change in the allocation of carbon below the ground due to the reduction in water availability.

Keywords: Water deficit; Cultivation age; Rooting depth; Fine Roots; Soil texture.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	15
CAPÍTULO 1 - DISTRIBUIÇÃO DE RAÍZES FINAS EM <i>EUCALYPTUS</i> SPP. EM CONDIÇÕES CLIMÁTICAS TROPICAIS E SUBTROPICAIS	17
1.1 INTRODUÇÃO.....	19
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	20
1.3 RESULTADOS	23
1.4 DISCUSSÃO.....	28
1.5 CONCLUSÃO	31
REFERÊNCIAS	32
CAPÍTULO 2 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE RAÍZES FINAS EM <i>EUCALYPTUS UROPHYLLA</i> AO LONGO DE UM GRADIENTE EDAFOCLIMÁTICO.	17
2.1 INTRODUÇÃO.....	37
2.2 METODOLOGIA	38
2.3 RESULTADOS	43
2.4 DISCUSSÃO.....	49
2.5 CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS	52
CAPITULO 3 – OS PADRÕES DE ENRAIZAMENTO PROFUNDO DE <i>EUCALYPTUS SPP</i> SÃO ALTERADOS COM A IDADE	56
3.1 INTRODUÇÃO.....	58
3.2 METODOLOGIA	59
3.3 RESULTADOS	62
3.4 DISCUSSÃO.....	66
3.5 CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS	70
CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
REFERÊNCIAS	75

INTRODUÇÃO GERAL

Com a expansão da silvicultura para regiões de fronteiras, áreas caracterizadas pela inconstância climática associado a falta de estudos da adaptação destes clones a estas condições, podem culminar na queda de produtividade dos maciços florestais (BINKLEY et al., 2017). O que é observado para o gênero *Eucalyptus* spp. que, apesar de constituir uma vasta gama de espécies, com boa adaptação a distintas condições climáticas (STAPE et al., 2004), tem demonstrado estagnação e até mesmo declínio de seu incremento volumétrico em algumas localidades (BINKLEY et al., 2017).

Dentre os fatores que podem repercutir negativamente sobre os processos fisiológicos da planta nestas regiões, destaca-se a variação da disponibilidade hídrica. Tornando essencial o estudo da distribuição da água ao longo do perfil do solo, o que posteriormente permitirá determinar regiões onde o sistema radicular atua de forma mais efetiva (LEITE et al., 1999). Outro ponto alavancado por Hendrick & Pregitzer (1996) é o de que a biomassa radicular apresenta grande relevância para a compreensão das relações fonte/dreno na árvore.

As raízes são detentoras de grande importância na absorção de água pela planta, além de sua participação no ciclo hidrológico, cuja abrangência varia desde micro (rizosfera) a macro escalas (bacias hidrográficas) com reflexo direto sobre o ecossistema terrestre (KLEIDON & HEIMAN, 2000). Raízes grossas (diâmetro > 2 mm) possuem funções com maior caráter de especialização, como, fixação da planta ao solo, transporte e armazenamento de nutrientes e água (ADDO-DANSO et al., 2016). Apesar da constituição total do volume radicular ser representada por raízes grossas (VOGT et al., 1998), são as raízes finas que apresentam maior importância nos ciclos biogeoquímicos e produtividade dos ecossistemas (ADDO-DANSO et al., 2016), contribuindo com mais de 50% da produtividade primária líquida total das florestas (NAVROSKI et al., 2010).

Tal fato é condizente com sua capacidade em influenciar a produção e emissão de gases, pois fornecem o C e N lábeis necessários para a produção microbiana durante a respiração (SILVER et al., 2000). Tornando-a especificamente importante no ciclo do carbono, em decorrência do aumento da atividade microbiana com consequente aumento da decomposição de matéria orgânica, nestes casos chegando a representar de 20 a 70% da produção primária líquida de diversas espécies florestais (LAMBAIS, 2015).

O que torna imprescindível a compreensão da distribuição, quantidade e funcionamento do sistema radicular para o entendimento da fisiologia da planta, pois, além de mecanismos primários, estas, tendem a apresentar mecanismos de proteção, quando submetidas a condições adversas (NAVROSKI et al., 2010). Dentre as estratégias adotadas pelas plantas destaca-se a “tolerância” ao estresse hídrico, onde, na ocasião ocorre maior produção de raízes finas e a “prevenção”, cujo resultado é a morte das raízes finas em camadas superficiais, com posterior incremento de outras raízes em maiores profundidades (HUANG; DUNCAN; CARROW, 1997). Fato já retratado em plantios florestais, onde cerca de 60% das raízes finas estão concentradas em camadas do solo abaixo de um metro de profundidade (LACLAU et al., 2013), no entanto pouco se sabe a respeito da real importância das raízes profundas no funcionamento e crescimento das plantas (RADVILLE et al., 2016).

Logo, a elucidação do comportamento que o sistema radicular tende a apresentar, em decorrência de sua submissão a locais com condições climáticas contrastantes permitiria explicar processos ecofisiológicos básicos, tanto no quesito adaptação, balanço hídrico e nutrição mineral. Pois, se é de conhecimento que o crescimento das plantas tanto da parte aérea quanto radicular é resiliente as estratégias por parte do indivíduo em explorar o ambiente, dependendo primariamente do desenvolvimento de raízes finas (GONÇALVES et al., 2013). O que nos permitirá inferir sobre as possíveis causas da redução da produtividade, ou seja menor alocação de carbono para o fuste, que vem ocorrendo nos últimos anos.

CAPÍTULO 1

DISTRIBUIÇÃO DE RAÍZES FINAS DE *Eucalyptus* spp. AOS TRÊS ANOS EM CONDIÇÕES CLIMÁTICAS TROPICAIS E SUBTROPICAIS

RESUMO

Compreender quais variáveis climáticas influenciam o crescimento e a distribuição de raízes finas é essencial para entender como genótipos de *Eucalyptus* respondem aos processos ecológicos e a produtividade florestal acima e abaixo do solo. Avaliou-se a distribuição de raízes finas em profundidade para quatro genótipos de *Eucalyptus* cultivados em condições climáticas contrastantes aos três anos de idade. Os sítios em estudo apresentaram déficit hídrico anual variando de ~0 a ~588 mm. Em ambientes tropicais, com até seis meses de déficit a densidade de raízes finas variou de ausente a 0,8 g. Kg⁻¹, com maior concentração até a profundidade de -400 cm. Em ambiente subtropicais, sem restrições hídricas, as raízes chegaram a -1100 cm de profundidade com densidade máxima de 0,4 g.Kg⁻¹ aos longo das camadas amostradas. Os genótipos em estudo exploraram grande volume de solo logo nos primeiros três anos independente da condição climática do sítio, chegando aos 11 m, com assimetria entre a parte aérea e o sistema radicular. Maiores profundidades (entre 3 e 11 metros) de enraizamento foram identificadas no sítio subtropical quando comparado ao tropical. Os genótipos A1 (*E. urophylla*) e C3 (*E. grandis* x *E. camaldulensis*) apresentaram maiores densidade de raízes finas quando cultivados em ambientes com elevado de déficit hídrico.

Palavras chave: Eucalipt; Densidade de raízes finas; Déficit hídrico; Resistência a seca.

CHAPTER 1
DISTRIBUTION OF FINE ROOTS OF *Eucalyptus* spp. AT THREE YEARS IN
TROPICAL AND SUBTROPICAL WEATHER CONDITIONS

ABSTRACT

Understanding which climatic variables influence the growth and distribution of fine roots is essential to understand how *Eucalyptus* genotypes respond to ecological processes and forest productivity above and below ground. The distribution of fine roots in depth was evaluated for four *Eucalyptus* genotypes grown under contrasting climatic conditions at three years of age. The sites under study presented an annual water deficit ranging from ~ 0 to ~ 588 mm. In tropical environments, with up to six months of deficit, the density of fine roots varied from absent to 0.8 g. Kg⁻¹, with greater concentration up to a depth of -400 cm. In subtropical environments, without water restrictions, the roots reached -1100 cm in depth with a maximum density of 0.4 g.Kg⁻¹ along the sampled layers. The genotypes under study explored a large volume of soil in the first three years, regardless of the climatic condition of the site, reaching 11 m, with asymmetry between the aerial part and the root system. Greater depths (between 3 and 11 meters) of rooting were identified at the subtropical site when compared to the tropical one. The genotypes A1 (*E. urophylla*) and C3 (*E. grandis* x *E. camaldulensis*) showed higher density of fine roots when grown in environments with high water deficit.

Key words: *Eucalyptus*; Density of fine roots; Water déficit; Drought resistance.

1.1 INTRODUÇÃO

As plantações de *Eucalyptus* cobrem cerca de 20 milhões de hectares em todo o mundo, sendo amplamente cultivado em regiões tropicais e subtropicais (BOOTH, 2013). Os cultivos brasileiros estão entre os ecossistemas florestais mais produtivos (BINKLEY et al., 2017; STAPE et al., 2010). A alta performance do gênero é resposta positiva aos elevados investimentos em tratamentos silviculturais, controle fitossanitário e seleção de genótipos pelos programas de melhoramento (GONÇALVES et al., 2013). Apesar dos avanços, a capacidade de adaptação e sobrevivência do eucalipto depende de como as plantas distribuem os recursos entre as folhas, ramos, caules e sistema radicular que é um processo complexo e desafiador para os fisiologistas de plantas (HANSON; WULLSCHLEGER, 1996).

Os sistemas radiculares podem ser caracterizados quanto ao hábito, arquitetura e intensidade. Logo, o crescimento, distribuição, profundidade do enraizamento e a densidade das raízes são os principais parâmetros morfológicos para entender a relação com a absorção de água e nutrientes do solo (FAN et al., 2016). As raízes grossas são cruciais em funções mecânicas, como a sustentação da planta ao solo. Por outro lado, raízes finas são responsáveis pela absorção dos recursos minerais disponíveis no solo com possibilidade de expansão da taxa de crescimento radicular para camadas profundas em períodos mais secos (LAMBAIS et al., 2017). Quanto maior o sistema radicular e mais finas as raízes, maior é a superfície de contato com o solo, e conseqüentemente, maior a absorção de água e nutrientes pela árvore, favorecendo o seu crescimento (GERMON et al., 2016).

O crescimento das árvores em geral aumenta com a precipitação (MURPHY; LUGO, 1986) e diminui com a seca (NATH et al., 2006). As árvores alocadas em locais sem restrições de disponibilidade hídrica apresentam maior tensão de superfície e de crescimento interno, enquanto que, as árvores alocadas em ambientes “secos” apresentam distribuição menor e mais uniforme da deformação de crescimento dentro de seus caules (NAGHIZADEH; WESSELS, 2021). Projeções climáticas sugerem aumento de temperatura e redução do volume de chuvas (CHOU et al., 2014), assim como, períodos de seca longos e severos em regiões tropicais e subtropicais (DAI, 2011).

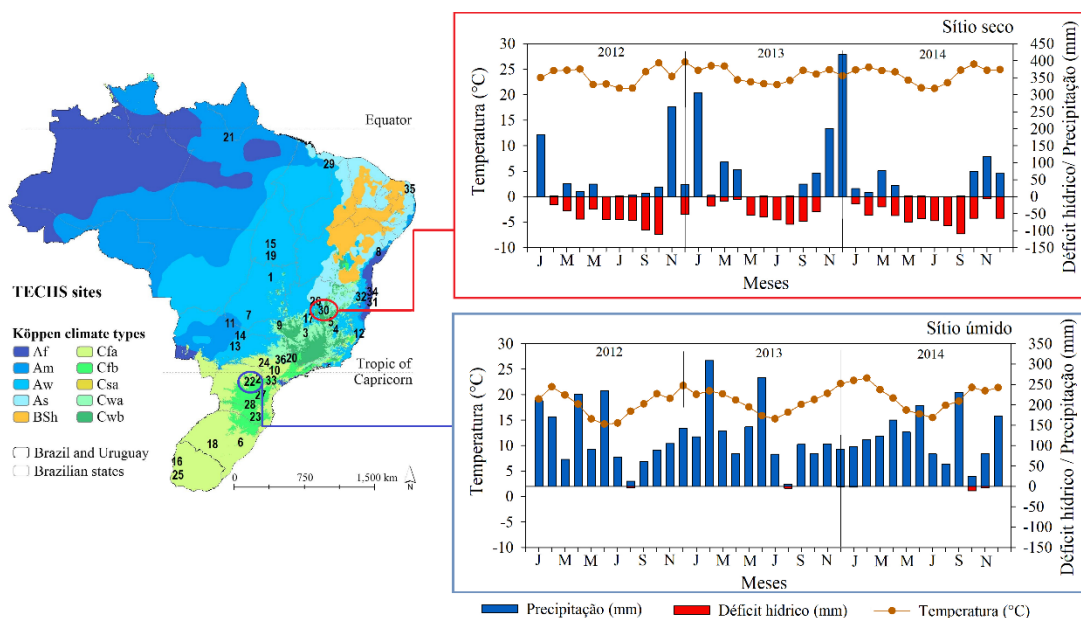
Características funcionais das plantas costumam mudar ao longo dos gradientes ambientais (PFAUTSCH et al., 2016) à medida que as plantas resistem aos

eventos climáticos extremos, as mesmas possuem a capacidade de se adaptar a ambientes distintos para se desenvolver (GERMON et al., 2020). A manipulação da arquitetura do sistema radicular se torna fundamental para a domesticação e melhoramento das plantas. Tal estratégia favorece o aumento da taxa de sobrevivência em solos com limitações hídricas ou pobres em nutrientes (NIBAU; GIBBS; COATES, 2008). O objetivo deste estudo foi determinar o efeito de condições climáticas contrastantes na dinâmica de raízes finas em profundidade para diferentes genótipos de *Eucalyptus*. Propomos a hipótese de que as árvores investem maior biomassa abaixo do solo em resposta ao aumento do déficit hídrico no solo independente do genótipo avaliado.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos em dois sítios com condições climáticas contrastantes, pertencentes a Rede experimental do Programa Cooperativo de Tolerância de Clones de *Eucalyptus* a Estresses Hídricos, Térmicos e Abióticos (BINKLEY et al., 2020) (Fig. 1). O ambiente com clima tropical é seco e quente e se situa próximo a Bocaiuva - MG (17,32 ° S, 43,77 ° W), com precipitação de média anual 752 mm, temperatura média anual de 24°C e déficit hídrico de até 588 mm.ano⁻¹ para o período de avaliações. O sítio de clima subtropical, com chuvas bem distribuídas, localizado em Telêmaco Borba – PR (22,35°C, 46,97°W) apresentou precipitação de 1490 mm.ano⁻¹, temperatura média anual de 19°C e praticamente ausência de déficit hídrico. Os dados climáticos foram obtidos de estações meteorológicas localizadas próximas aos sítios. Na ocorrência de falhas dos sensores, foi realizado o preenchimento conforme metodologia descrita em Elli et al., (2019).

Figura 1 – Distribuição espacial dos sítios do Projeto TECHS e localização dos sítios em estudo (círculos em vermelho). Temperatura, precipitação e déficit hídrico para o período de 2012 a 2014 para os sítios localizados em Bocaiuva – MG (30) e Telêmaco Borba – PR (22)



Fonte: Binkley et al., (2017) Adaptado.

A seleção dos genótipos de estudo foi baseada em aspectos adaptativos, potencial produtivo e importância para o setor de florestas plantadas brasileiras. O *E. urophylla* (A1), com origem em clima Cwa (clima subtropical com inverno seco), retrata o material genético mais plantado no Brasil, por suas características de plasticidade. O genótipo *E. urophylla* x *E. grandis* (B2), por sua vez apresenta altas taxas de crescimento principalmente em condições ambientais favoráveis, como elevada disponibilidade hídrica e baixas temperaturas. Os clones *E. grandis* x *E. camaldulensis* (C3) e *E. urophylla* x *E. tereticornis* (P7) são caracterizados como tolerantes à seca (BINKLEY et al., 2017).

O plantio foi realizado no final de 2011 em parcelas de 0,2 ha com espaçamento de 3 x 3 m (1111 árvores ha⁻¹), seguindo a técnica de plantio em cultivo mínimo e fertilização intensiva durante o primeiro ano (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). Ambos os solos dos sítios em estudo são classificados como latossolo, porém para o sítio de Bocaiuva – MG apresenta maiores percentagem de argila (76%) quando comparado ao solo de cultivo presente em Telêmaco Borba – PR com apenas

56% (Tab. 1). Herbicidas foram usados no controle de ervas daninhas antes do plantio e durante os primeiros anos de cultivo sempre que necessário, assim como o controle de formiga e outras pragas ocasionais, maiores detalhes sobre os tratamentos silviculturais podem ser encontrados em Binkley et al., (2017).

Tabela 1 – Localização dos sítios em estudo e caracterização física dos solos para a profundidade de 0-40 cm

Sítio	Ordem do Solo	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Matéria orgânica (g.L ⁻¹)
Bocaiuva - MG	Latossolo	76	14	10	47,5
Telêmaco Borba - PR	Latossolo	56	23	21	52,0

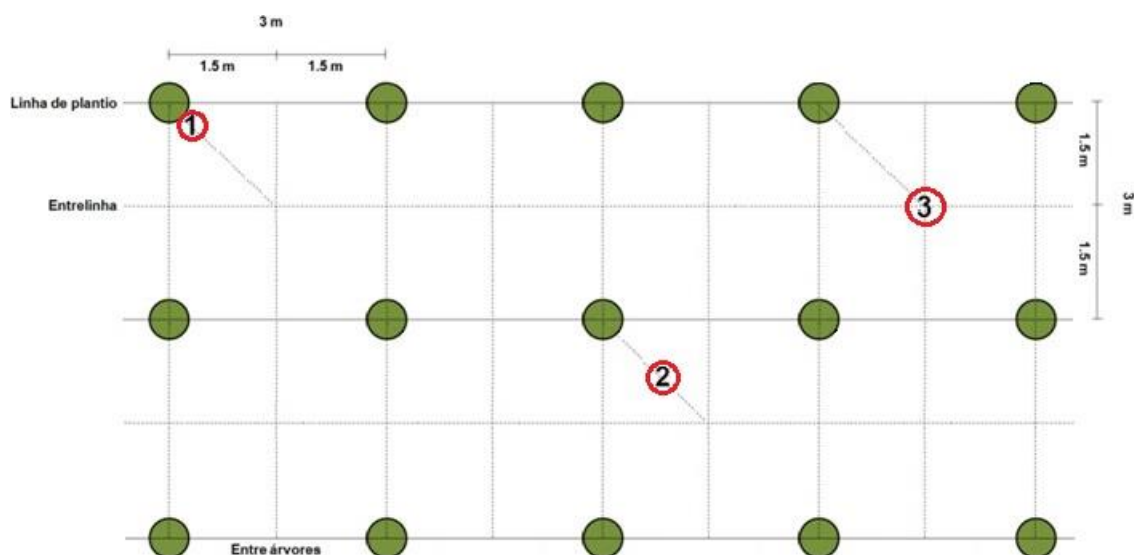
A biomassa seca acima do solo foi determinada através da amostragem de seis árvores por material genético (total de 48 árvores), as quais foram previamente selecionadas comtemplar seis classes diamétricas. As árvores foram divididas em madeira do tronco, galhos e folhas, os componentes foram pesados no local de amostragem e amostras representativas foram secas a 65°C até um peso constante para determinação da massa seca.

A biomassa radicular foi dividida em raízes finas (raízes com diâmetro inferior a 2mm) e raízes grossas (raízes superiores a 2mm e o toco). Raízes vivas foram determinadas através da cor e resistência, amarelas e flexíveis consideradas vivas e coloração escura e quebráveis as mortas (PINHEIRO et al., 2016). A amostragem de raízes finas foi realizada aos três anos de idade, através da coleta de solo com auxílio de trado motorizado, acoplado com hastes de ferro que possuem em sua extremidade uma broca de 100mm de diâmetro e 40 cm de altura, responsável pela coleta do solo.

As coletas foram realizadas em três pontos (diferentes posições) por parcela (clone) situados próximos a indivíduos que representavam o diâmetro médio da parcela, até a profundidade máxima em que se encontrou raízes finas com retirada de amostras a cada 50 cm (Fig. 2). As amostras de solo de cada camada foram lavadas e as raízes finas, separadas com auxílio de pinça. A biomassa de raízes finas (g.m⁻²) foi estimada a partir da determinação da densidade das raízes (massa seca das raízes em função da massa seca do solo) (g.kg⁻¹ de solo), e da densidade aparente do solo (massa seca do solo em função do volume). Na ocasião também foram realizadas coletas de raízes grossas e toco, onde juntamente com a realização da biomassa

aérea, foram feitas escavações para retirada dos tocos e raízes grossas das quatro plantas amostradas.

Figura 2 – Posição de amostragem de raízes finas em relação as árvores da parcela



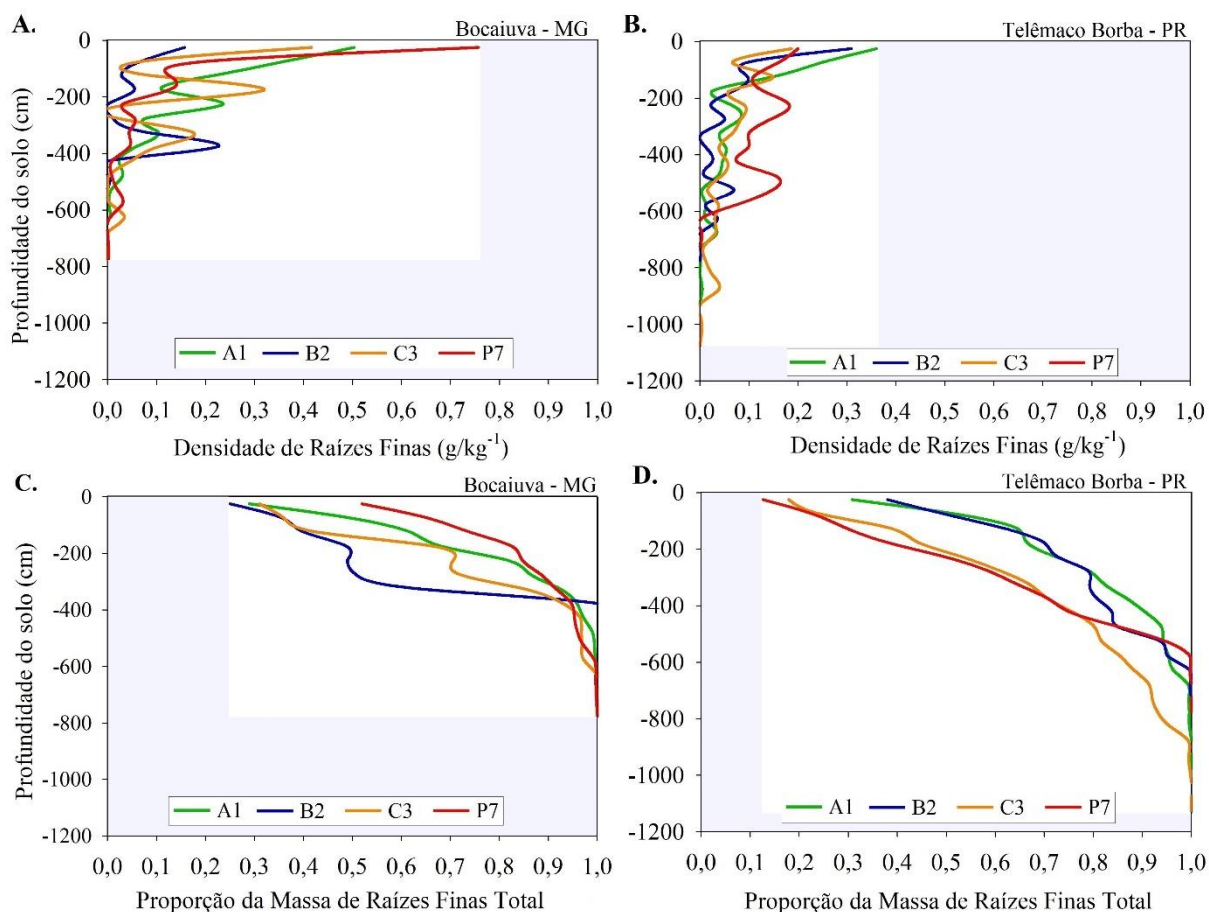
A densidade de raízes finas, altura de plantas, profundidade máxima de raízes finas, biomassa de folhas, madeira e raízes grossas. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com número de repetições variando de acordo com a variável amostrada. Os dados foram submetidos ao teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk). E posteriormente submetidos a análise de variância (ANOVA) para verificar a existência de interação entre clone e sitio de implantação. Na presença de significância os dados foram comparados mediante o teste de Tukey a 5% de probabilidade ($P \leq 0,05$). Para execução das análises estatísticas, foram utilizados os programas estatísticos *R studio* e *SigmaPlot 12.5*.

1.3 RESULTADOS

Tendências contrastantes sobre a área explorada pelas raízes nos ambientes tropicais e subtropicais foram observadas. A maior densidade de raízes finas prevalece nas camadas superficiais do solo (até -25 cm) com valores entre 0,16 a 0,76 g. Kg⁻¹ (Fig. 3A e B). A área de solo explorada pelas raízes finas apresenta alta variabilidade. Em ambientes tropicais, com até seis meses de déficit a densidade de

raízes finas variou de ausente a $0,8 \text{ g. Kg}^{-1}$, com maior concentração até a profundidade de -400 cm . Em ambiente subtropicais, sem restrições hídricas, as raízes chegaram a -1100 cm de profundidade com densidade máxima de $0,4 \text{ g.Kg}^{-1}$ aos longo das camadas amostradas.

Figura 3 – Distribuição de raízes finas (A e B) e para as três posições independentes

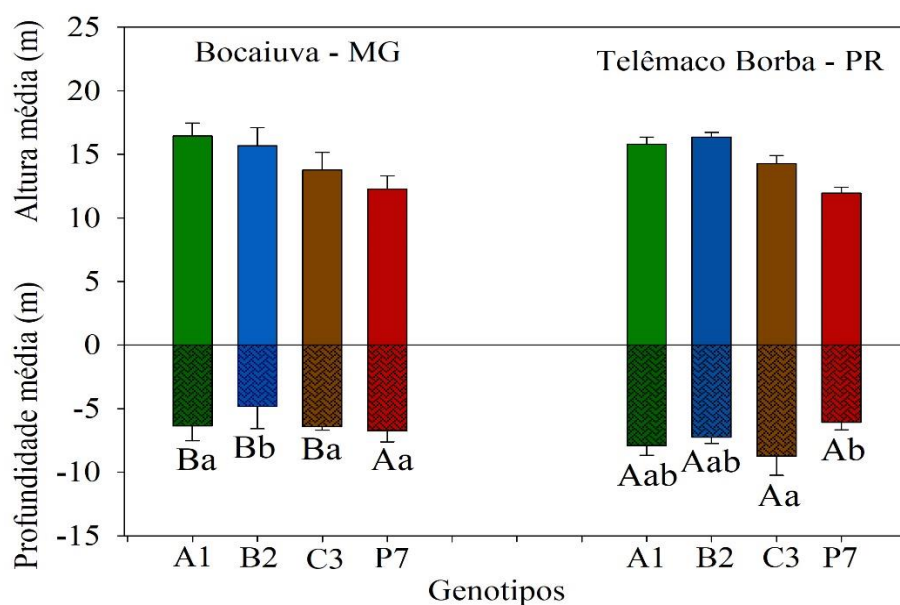


O genótipo P7 (*E. urophylla* x *E. tereticornis*) se distingue dos demais por sua capacidade de explorar maior área através das raízes finas (Fig. C e D). Em ambiente tropical 70 % da massa de raízes finas deste genótipo situa-se nos primeiros -100 cm de profundidade, e o restante nas demais camadas (de -100 a -800 cm). Entretanto em ambientes subtropicais apenas 30% das raízes situam-se nos primeiros 100 cm de profundidade.

O ambiente subtropical proporcionou maior profundidade radicular principalmente para os genótipos A1 (27%), B2 (62%) e C3 (27), comportamento este, não evidenciado para o genótipo P7, cuja profundidade máxima é semelhante entre

os dois locais (Fig.4). Ainda no ambiente úmido, o genótipo C3 apresentou a maior profundidade de enraizamento (8,75 metros). Já em ambiente com limitações hídricas o genótipo B2 apresentou menor nível de enraizamento, alcançando uma profundidade de apenas 2,75m, o que não é observado no ambiente úmido, pois neste sítio, o genótipo P7 é responsável pela menor profundidade (6 metros).

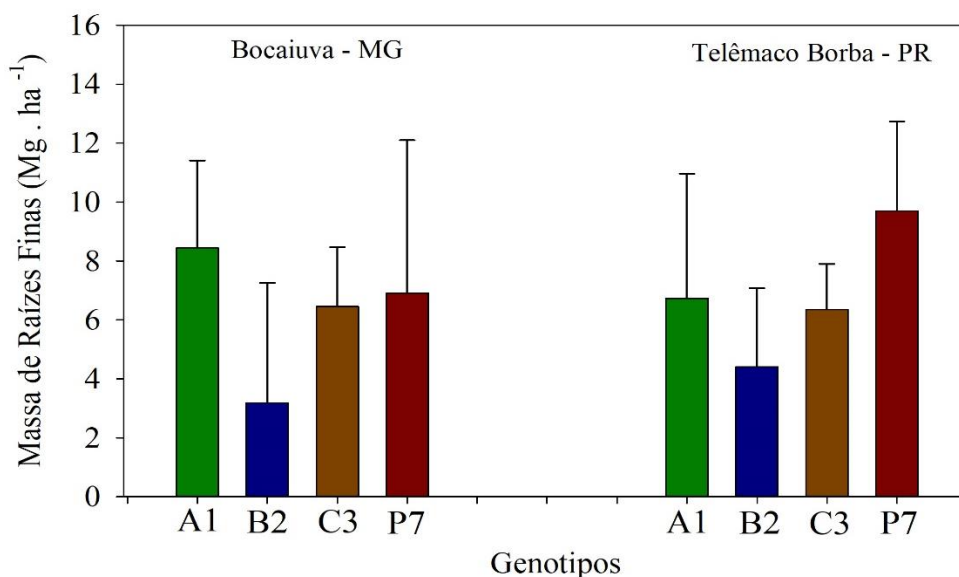
Figura 4 – Média da altura das árvores e da profundidade máxima alcançada pelas raízes finas (em metros) para os quatro materiais genéticos estudados quando cultivados em Bocaiuva – MG e Telêmaco Borba – PR aos 3 anos de idade. As barras verticais representam o desvio padrão para altura média e profundidade máxima atingida pelas raízes finas. *Letras maiúsculas comparam os sítios para o mesmo genótipo e letras minúsculas os genótipos dentro do sítio



A profundidade máxima de raízes finas para todos os genótipos em ambiente sem restrições hídricas corresponde a 50% da altura total da parte aérea. Entretanto, em ambientes com longos períodos de seca (>6 meses), a relação entre profundidade de raízes finas e altura é extremamente variável entre os materiais genéticos. O genótipo B2 apresentou a menor relação entre a profundidade máxima de enraizamento e altura, independente do ambiente de cultivo, sendo observado a altura da parte aérea até 5x superior a profundidade máxima de enraizamento, em Bocaiuva-MG.

Os locais em estudo deixam claro a contrastante variação para a massa de raízes finas (3,2 a 9,6 ton. ha⁻¹). Ambos os sítios destacaram o clone B2 pela baixa densidade de raízes finas, enquanto o clone A1 apresentou melhores performances em ambientes tropicais o genótipo P7 vem conquistando espaço em ambiente subtropical (Fig.5). Os genótipos A1 e C3 apresentam densidade de raízes finas superiores no ambiente tropical (25 e 1,5% respectivamente). Resultado oposto é verificado para os genótipos B2 e P7, os quais apresentam aumento de 28 e 29% respectivamente na densidade de raízes finas em ambiente com déficit hídrico.

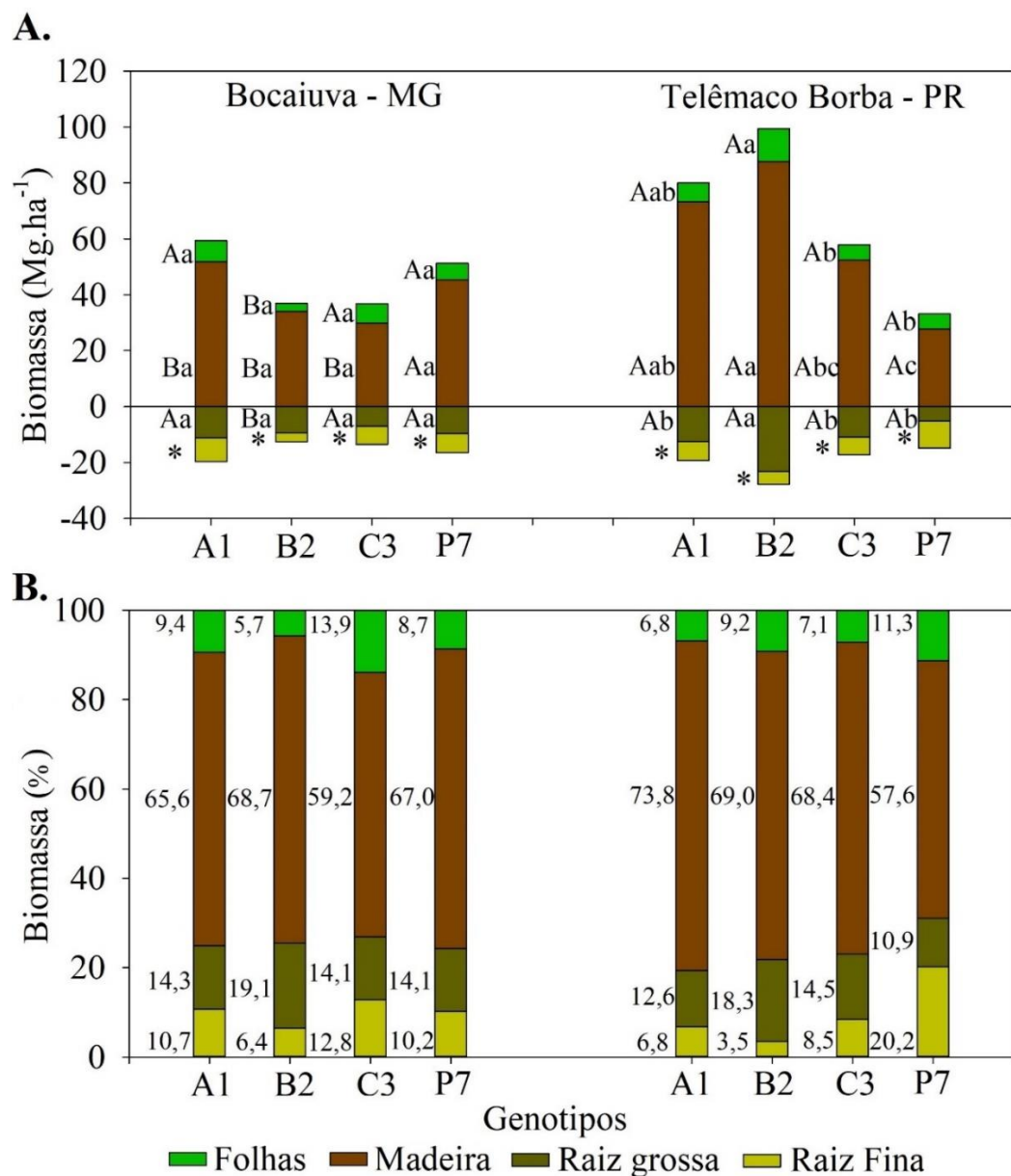
Figura 5 – Média da densidade de raízes finas para os quatro materiais genéticos estudados quando cultivados em Bocaiuva – MG e Telêmaco Borba – PR aos 3 anos de idade. As barras verticais representam os desvios padrões para a densidade de raízes finas dos tratamentos. Não há diferença estatística entre os tratamentos



No sítio tropical não houve diferença entre os genótipos para a biomassa de folhas, madeira e raízes grossa, sendo esta encontrada somente para o sítio úmido, no qual o genótipo B2 apresenta valores superiores para todos os componentes (Fig. 6A). O genótipo B2 apresenta biomassa de folhas em ambiente úmido 76% superior ao seco, já para os demais genótipos não são verificadas interferências do ambiente nesta variável. Comportamento similar é encontrado para as raízes grossas, sendo 56% superior em ambiente úmido quando comparado ao seco para o clone B2. Todavia para a biomassa alocada no fuste, apenas o genótipo P7 apresenta diferença

em função do local, sendo 60% superior em ambiente seco quando comparado ao úmido.

Figura 6 – Biomassa para os componentes madeira (fuste, galho e casca), folhas, raízes grossas (<2mm) e raízes finas (<1mm) aos 3 anos para os genótipos A1, B2 C3 e P7 quando cultivados em Bocaiuva – MG e Telêmaco Borba – PR (B). * Letras maiúsculas comparam os sítios para o mesmo genótipo e letras minúsculas os genótipos dentro do sítio. * não foi verificada diferença estatística para esses componentes



Por fim a biomassa total para os componentes folhas, madeira, raízes grossas e raízes finas aos três anos, notamos que dentre os genótipos estudados o P7

apresenta maior valor de alocação nas raízes finas (20%) quando cultivado em Telêmaco Borba –PR (Fig.6B). Já o genótipo B2 apresenta os menores valores para raízes finas independente do ambiente de cultivo, com valores de 6,4 e 3,5 Mg. ha⁻¹ para os sítios de Bocaiuva-MG e Telêmaco Borba – PR respectivamente. Este material genético apresenta a maior biomassa de raízes grossas para os dois ambientes em estudo.

1.4 DISCUSSÃO

Raízes finas foram majoritariamente encontradas nas camadas superficiais do solo (<200cm) para todos os genótipos quando cultivados em solos tropicais e subtropicais de baixa fertilidade (Fig. 3). Na tentativa de maximizar a absorção de nutrientes e reduzir as perdas por lixiviação, as raízes finas se concentram nos primeiros 50 cm do perfil do solo, onde são encontrados altos teores de matéria orgânica e elevadas concentrações de minerais provindos da decomposição da serapilheira e dos tratos silviculturais (LACLAU et al., 2004). Assim, camadas mais profundas (abaixo de 100 cm) contam com a redução da concentração de nutrientes disponíveis (VERSINI et al., 2014), e conseqüentemente redução da densidade de raízes finas.

A elevada disponibilidade hídrica (>1450mm por ano), favoreceu a distribuição de raízes finas após 50 cm de profundidade. Por outro lado, ambiente com baixa precipitação média anual (<750mm) são responsáveis por aumentar uniformidade na distribuição das raízes. Adicionalmente, solos com maior capacidade para reter água apresentam menor resistência a penetração quando comparado a solos secos (MORONI; WORLEDGE; BEADLE, 2003). Tal fato esclarece o crescimento em profundidade no sítio subtropical e impulsiona o crescimento lateral no ambiente com restrição hídrica.

O padrão de distribuição de raízes finas do genótipo P7 (*E. urophylla* x *E. tereticornis*) é contrastante aos demais genótipos em estudo (Fig. 3). Possivelmente é reflexo das características intrínsecas ao seu local de origem. Este material genético foi desenvolvido em região com elevadas temperaturas e baixa disponibilidade hídrica no solo (CAMPOE et al., 2020). Tal característica pode estimular o acúmulo de raízes finas nos primeiros 50 cm de solo para garantir a sua sobrevivência. Porém, quando

cultivado em ambiente sem déficit hídrico, a distribuição das raízes é uniforme ao longo dos perfis.

Grande volume de solo foi explorado por todos os materiais genéticos logo no terceiro ano após o plantio, atingindo valores médios de 3 a 9 metros de profundidade máxima de enraizamento. Esta variabilidade na profundidade de frente de raiz finas, em função dos genótipos e sítios avaliados, consiste de um critério interessante a ser considerados antes do plantio de clones selecionados pelos programas de melhoramento florestal. Visto que o enraizamento profundo consiste de uma estratégia da planta para maximizar a absorção de água e nutrientes necessárias durante o estágio inicial de crescimento (LAMBAIS et al., 2017), assim como garantir maiores taxas de sobrevivência em ocorrência de secas severas (PINHEIRO et al., 2016).

A hipótese de que genótipos de *Eucalyptus* aumentam a profundidade de exploração do solo pelas raízes finas quando cultivados em ambientes com restrições hídricas (CHRISTINA et al., 2011) foi parcialmente aceita neste estudo. Somente o P7 (*E. urophylla* x *E. tereticornis*), material genético tolerante a seca apresentou profundidade máxima de raízes finas superior no ambiente seco quando comparado ao úmido. Os demais materiais genéticos apresentam maiores profundidades de raízes finas quando cultivado em ambiente subtropical.

O consumo de água para os genótipos A1 e C3 em ambiente subtropical é superior ao ambiente tropical, devido a capacidade adaptativa e disponibilidade de recursos (água para transpiração) (HUBBARD et al., 2020). As folhas e raízes são hidraulicamente interdependentes, fazendo com o que as árvores ajustem a área de captação de água a área de perda (MACKAY et al., 2015). Maiores índices de área foliar foram obtidos para esses genótipos quando cultivados no sítio subtropical (BINKLEY et al., 2017). Logo a presença de presença de raízes finas em perfis mais profundos consiste em uma resposta à disponibilidade hídrica do ambiente subtropical (Fig. 3) assim como a maior produtividade líquida que os genótipos possuem quando cultivados nesse ambiente (Fig.6). Embora a profundidade de raízes finas não tenha correlação com o conteúdo de água no solo, supõe que a alocação de carbono para a formação de raízes profundas também seja uma resposta fisiológica da planta a uma rápida exaustão da água nas camadas superficiais do solo (LAMBAIS et al., 2017), refletindo as características de resistência a seca dos genótipos A1, C3 e P7.

A maioria dos modelos de crescimento consideram o desenvolvimento abaixo do solo sincronizado com o acima do solo (ABRAMOFF; FINZI, 2015), assim como experimentos realizados com *Eucalyptus* de elevada produtividade na América do Sul (CHRISTINA et al., 2011; PINHEIRO et al., 2016) relataram este comportamento. Os genótipos em estudo não apresentaram esta simetria entre a parte aérea e o sistema radicular, demonstrando que a profundidade de frente de enraizamento chega a apenas 50% da altura total das árvores aos três anos.

O genótipo B2 apresentou a menor relação de crescimento acima e abaixo do solo aos três anos, no qual a altura da parte aérea é cinco vezes superior a profundidade máxima de enraizamento (Fig. 4). Além de apresentar a menor profundidade de enraizamento, também possui a menor densidade de raízes finas independente do ambiente de estudo. Este genótipo possui origem em clima com distribuição de chuvas uniforme e temperaturas amenas durante o ano (Ah), característico de elevadas produtividades em sítios com maiores disponibilidades de recursos (água, luz, nutrientes, dentre outros) (CAMPOE et al., 2020). Segundo estes autores, esse material genético destina apenas 40% da produtividade total bruta (GPP) para as raízes, enquanto, por exemplo, o genótipo P7 chega a 50%.

Os genótipos A1 (*E. urophylla*) e C3 (*E. grandis* x *E. camaldulensis*) apresentaram maiores densidade de raízes finas quando cultivados em ambientes com presença elevada de déficit hídrico (580mm). O que é conferido pela característica de plasticidade fenotípica que esses materiais genéticos possuem (Fig.3) (BINKLEY et al., 2017), reduzindo a alocação de carbono para o caule e acumulando-a na produção de raízes finas. Pode-se esperar que genótipos cultivados em ambiente com déficit hídrico elevados apresentem maiores densidades de raízes finas como alternativa de evitar ou até mesmo tolerar o abastecimento inadequado de água (HUBBARD et al., 2020). Todavia, este comportamento não é observado para os genótipos P7 (*E. urophylla* x *E. tereticornis*) e B2 (*E. urophylla* x *E. grandis*), os quais a taxa de alocação de compostos para produção de raízes finas aumentou com a maior disponibilidade de recursos.

Apesar da densidade de raízes finas para o sitio seco ser inferior ao úmido para os genótipos quando analisamos esta variável separadamente, ao concilia-la com os demais compartimentos (folhas, madeira e raízes grossas) notamos que a maioria dos genótipos cultivados em ambiente seco apresentam sim maior alocação de carbono

para a formação de raízes finas (Fig. 6), com exceção do genótipo P7 que apresenta a estratégia de enraizamento profundo (Fig. 4).

Os padrões de partição de biomassa para os compartimentos folhas, fuste, raízes grossas e finas ocorreram de acordo com a disponibilidade de recursos como água, luz, nutrientes do sítio de cultivo (CAMPOE et al., 2020; LITTON; RAICH; RYAN, 2007). O sítio de Telêmaco Borba – PR é caracterizado por temperaturas amenas e chuvas regularmente distribuídas ao longo do ano (Fig. 1), neste ambiente os clones (com exceção do P7) apresentaram maior produtividade total e alocação de carbono para o fuste (Fig. 6). Porém, no ambiente seco (Bocaiuva – MG), além de apresentar menores produtividades, os genótipos também aumentaram a partição de carbono abaixo do solo. Além do mais, os materiais genéticos mais tolerantes a seca como o P7, são menos produtivos, pois os mecanismos de tolerância a seca envolvem altos custos metabólicos, como o controle estomático e desenvolvimento de sistema radicular.

A disponibilidade de água é considerada uma das principais restrições ao crescimento das plantas de *Eucalyptus*, pois essa afeta diretamente a eficiência do uso de recursos, e conseqüente alocação de biomassa (STAPE; BINKLEY; RYAN, 2004). A maior alocação de carbono para os componentes abaixo do solo foi demonstrada neste estudo como uma alternativa para amenizar os danos causados pelo elevado déficit hídrico, acessando água em camadas profundas do solo.

1.5 CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou uma rápida exploração das camadas profundas do solo por raízes finas para genótipos de *Eucalyptus* spp logo aos três anos, atingindo até 11 metros de profundidade. Embora as raízes finas sejam encontradas em elevadas profundidades, cerca de 50% da biomassa total de raízes finas se encontram no primeiro metro de solo, com tendência de maiores valores para genótipos cultivados em ambientes tropicais.

Apesar dos fatores que atuam sobre o crescimento de raízes finas serem complexos, o déficit hídrico do solo atuou como um dos principais precursores para o aumento na biomassa abaixo do solo neste estudo. O que torna o comportamento dos componentes subterrâneos excelentes aliados na seleção de genótipos mais adaptados em um contexto de alterações climáticas.

REFERÊNCIAS

- ABRAMOFF, R. Z.; FINZI, A. C. Are above- and below-ground phenology in sync? **New Phytologist**, Cambridge, v. 205, n. 3, p. 1054–1061, 2015.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C. A.; CARNEIRO, R. L.; STAPE, J. L. Variation in whole-rotation yield among Eucalyptus genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS project. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 462, n. December 2019, p. 117953, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117953>>
- 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, n. September, p. 271–283, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>>
- BOOTH, T. H. Eucalypt plantations and climate change. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 28–34, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.004>>
- CAMPOE, O. C.; ALVARES, C. A.; CARNEIRO, R. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; HUBBARD, R. M.; STAHL, J.; MOREIRA, G.; FABIANO, L. Climate and genotype influences on carbon fluxes and partitioning in Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management** Amsterdam, v. 475, n. July, 2020.
- CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, [s. l.], v. 03, n. 05, p. 438–454, 2014.
- 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**, Washington, v. 2, n. 3, p. 1–10, 2011.
- DAI, A. Drought under global warming: A review. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, United States, v. 2, n. 1, p. 45–65, 2011.
- ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; DE FREITAS, C. H.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C. A. Intercomparison of structural features and performance of Eucalyptus simulation models and their ensemble for yield estimations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 450, n. July, p. 117493, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117493>>
- FAN, J.; MCCONKEY, B.; WANG, H.; JANZEN, H. Root distribution by depth for temperate agricultural crops. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 189, p. 68–74, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2016.02.013>>

GERMON, A.; CARDINAEL, R.; PRIETO, I.; MAO, Z.; KIM, J.; STOKES, A.; DUPRAZ, C.; LACLAU, J. P.; JOURDAN, C. Unexpected phenology and lifespan of shallow and deep fine roots of walnut trees grown in a silvoarable Mediterranean agroforestry system. **Plant and Soil**, The Hague, v. 401, n. 1–2, p. 409–426, 2016.

GERMON, A.; LACLAU, J. P.; ROBIN, A.; JOURDAN, C. Tamm Review: Deep fine roots in forest ecosystems: Why dig deeper? **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 466, n. February, 2020.

GONÇALVES, J. L. de M.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. de B.; LIMA, W. de P.; BRANCALION, P. H. S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 6–27, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>>

HANSON, P. J.; WULLSCHLEGER, S. D. **North American Temperate Deciduous Forest Responses to Changing Precipitation Regimes**. [s.l.: s.n.]. v. 166

HUBBARD, R. M.; CARNEIRO, R. L.; CAMPOE, O.; ALVARES, C. A.; FIGURA, M. A.; MOREIRA, G. G. Contrasting water use of two Eucalyptus clones across a precipitation and temperature gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 475, n. June, p. 118407, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118407>>

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**, London, v. 93, n. 3, p. 249–261, 2004.

LAMBAIS, G. R.; JOURDAN, C.; DE CÁSSIA PICCOLO, M.; GERMON, A.; PINHEIRO, R. C.; NOUVELLON, Y.; STAPE, J. L.; CAMPOE, O. C.; ROBIN, A.; BOUILLET, J. P.; LE MAIRE, G.; LACLAU, J. P. Contrasting phenology of Eucalyptus grandis fine roots in upper and very deep soil layers in Brazil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 421, n. 1–2, p. 301–318, 2017.

LITTON, C. M.; RAICH, J. W.; RYAN, M. G. Carbon allocation in forest ecosystems. **Global Change Biology**, Oxford, v. 13, n. 10, p. 2089–2109, 2007.

MACKAY, D. S.; ROBERTS, D. E.; EWERS, B. E.; SPERRY, J. S.; MCDOWELL, N. G.; POCKMAN, W. T. Interdependence of chronic hydraulic dysfunction and canopy processes can improve integrated models of tree response to drought. **Water Resources Research**, Washington, v. 51, n. 8, p. 6156–6176, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.05.018>>

MORONI, M. T.; WORLEDGE, D.; BEADLE, C. L. Root distribution of Eucalyptus nitens and E. globulus in irrigated and droughted soil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 177, n. 1–3, p. 399–407, 2003.

MURPHY, P. G.; LUGO, A. E. FORESTI. **Ecology of tropical dry forestl** , Amsterdam, v. 17, p. 67–88, 1986.

NAGHIZADEH, Z.; WESSELS, C. B. The effect of water availability on growth strain in *Eucalyptus grandis-urophylla* trees. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 483, n. July 2020, p. 118926, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118926>>

NATH, C. D.; DATTARAJA, H. S.; SURESH, H. S.; JOSHI, N. V.; SUKUMAR, R. Patterns of tree growth in relation to environmental variability in the tropical dry deciduous forest at Mudumalai, southern India. **Journal of Biosciences**, Bangalore, v. 31, n. 5, p. 651–669, 2006.

NIBAU, C.; GIBBS, D. J.; COATES, J. C. Branching out in new directions: The control of root architecture by lateral root formation. **New Phytologist**, Cambridge, v. 179, n. 3, p. 595–614, 2008.

PFAUTSCH, S.; HARBUSCH, M.; WESOLOWSKI, A.; SMITH, R.; MACFARLANE, C.; TJOELKER, M. G.; REICH, P. B.; ADAMS, M. A. Climate determines vascular traits in the ecologically diverse genus *Eucalyptus*. **Ecology Letters**, Oxford, v. 19, n. 3, p. 240–248, 2016.

PINHEIRO, R. C.; DE DEUS, J. C.; NOUVELLON, Y.; CAMPOE, O. C.; STAPE, J. L.; ALÓ, L. L.; GUERRINI, I. A.; JOURDAN, C.; LACLAU, J. P. A fast exploration of very deep soil layers by *Eucalyptus* seedlings and clones in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 366, p. 143–152, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.02.012>>

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. *Eucalyptus* production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, n. 1–2, p. 17–31, 2004.

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. de 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, n. 9, p. 1684–1694, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.012>>

VERSINI, A.; MARESCHAL, L.; MATSOUMBOU, T.; ZELLER, B.; RANGER, J.; LACLAU, J. P. Effects of litter manipulation in a tropical *Eucalyptus* plantation on leaching of mineral nutrients, dissolved organic nitrogen and dissolved organic carbon. **Geoderma**, Amsterdam, v. 232–234, p. 426–436, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.05.018>>

CAPÍTULO 2

DISTRIBUIÇÃO DE RAÍZES FINAS DE *Eucalyptus urophylla* AOS SEIS ANOS AO LONGO DE UM GRADIENTE EDAFOCLIMÁTICO

RESUMO

A morfofisiologia das raízes é regulada principalmente pelas características intrínsecas dos genótipos, todavia apresentam elevada plasticidade frente às condições edafoclimáticas. Avaliamos a distribuição de raízes finas em profundidade para o clone de *Eucalyptus urophylla* mais plantado no Brasil, em quatro condições climáticas distintas. A massa de raízes finas foi avaliada até a profundidade de 20 metros em quatro ambientes distintos sob dois níveis de disponibilidade hídrica (70 e 100 % da precipitação local). A dinâmica de raízes finas foi estudada com o uso de amostragens com trato mecanizado em três pontos por parcela. Densidades de raízes finas elevadas foram observadas nas camadas superficiais do solo (até -50 cm), com valores entre 0,08 a 0,71 g. Kg⁻¹ em ambos os níveis de precipitação. A maior profundidade de enraizamento foi obtida no sítio de Três Lagoas – MS, com as raízes finas atingindo 17,8 e 15,3 m para os tratamentos sem e com exclusão de chuvas, respectivamente. Os valores de massa de raízes finas para o *Eucalyptus urophylla* variaram de 1,69 a 10,27 Mg. ha⁻¹ entre os locais e níveis de precipitação. O *Eucalyptus urophylla* apresentou elevada plasticidade na distribuição e profundidade máxima de raízes finas em função da disponibilidade hídrica dos sítios.

Palavras chaves: Sistema radicular; Textura do solo; Deficiência hídrica; Alocação de biomassa.

CHAPTER 2
DISTRIBUTION OF FINE ROOTS OF *Eucalyptus urophylla* AT SIX YEARS OVER
AN EDAPHOCLIMATE GRADIENT

ABSTRACT

The morphophysiological characteristics of the roots are regulated mainly by the intrinsic characteristics of the genotypes, however they present high plasticity in the edaphoclimatic conditions. We evaluated the distribution of fine roots in depth for *Eucalyptus urophylla* when cultivated in four different climatic conditions. The mass of fine roots was evaluated up to a depth of 20 meters in four different environments under two levels of precipitation. The dynamics of fine roots was studied through sampling with mechanized tract at three different points per plot. High thin root densities were observed in the superficial layers of the soil (up to -50 cm), with values ranging from 0.08 to 0.71 g. Kg⁻¹ at both levels of precipitation. The greatest rooting depth was obtained at the Três Lagoas - MS site, with thin roots reaching 17.8 and 15.3 m for treatments without and excluding rainfall respectively. The values of mass of fine roots for *Eucalyptus urophylla* ranged from 1.69 to 10.27 Mg. ha⁻¹ between locations and rainfall levels. *Eucalyptus urophylla* showed high plasticity in the biomass partition due to the water availability of the sites, through a relative change in the allocation of carbon below the ground as the water supply decreased.

Key words: Root system; Soil texture; Water deficiency; Biomass allocation

2.1 INTRODUÇÃO

A produtividade dos maciços florestais é resultante da capacidade que a planta possui em maximizar a conversão dos recursos nutricionais, hídricos e da radiação solar em madeira e tecidos não lenhosos (BINKLEY; STAPE; RYAN, 2004; LITTON; RAICH; RYAN, 2007). Logo, compreender o comportamento no armazenamento de carbono ao longo do crescimento da floresta, em detrimento dos recursos naturais (TRUMBORE, 2006), são cruciais para entender as distintas produtividades obtidas ao longo dos gradientes climáticos. Pois, de todo carbono fixado na fotossíntese, cerca de 10 a 30% é alocado para o fuste (LITTON; RAICH; RYAN, 2007), sendo este, o componente com maior sensibilidade a nutrição e as condições climáticas.

Constante alteração nas condições climáticas em diversas localidades do mundo são notados como por exemplo, períodos mais secos e com maior duração (HE; SODEN, 2017). Em consequência disso, há relatos de reduções de até um terço da produtividade de madeira no Brasil onde rotações inferiores a sete anos são comuns (ALMEIDA et al., 2010). Condições climáticas severas (altas temperaturas) podem levar a morte da planta (MCDOWELL et al., 2018; WILLIAMS et al., 2013), devido a pequena faixa de adaptação climática que alguns clones possuem (BOOTH, 2013). O estudo do impacto das condições climáticas sobre as plantações de *Eucalyptus* torna-se importante ferramenta para minimizar possíveis ameaças em potencial (BOOTH, 2013), dado a magnitude de interferência que tais condições afetam sobre o fluxo de carbono acima e abaixo do solo (RYAN et al., 2010; STAPE et al., 2010).

Além dos fatores climáticos, características inerentes ao solo (textura e elementos minerais) e a disponibilidade hídrica são fundamentais para se atingir o potencial produtivo máximo dos maciços. Pois, possuem efeitos diretos e indiretos sobre o crescimento da árvore, como, diminuição da taxa fotossintética (VOSE; SWANK, 1994), redução da absorção de nutrientes, colapso funcional a nível citoplasmático (SANDS; MULLIGAN, 1990), dentre outros. É válido ressaltar que, a disponibilidade de água para as plantas também é recorrente de sua distribuição ao longo do perfil do solo, principalmente em solos de maior profundidade. A presença de água em profundidade, é dinâmico e tem grande influência sobre o crescimento radicular, que, conseqüentemente impacta a absorção de água pela planta (SCHYMANSKI et al., 2008).

Logo a manutenção do crescimento e a sobrevivência das plantas dependerá principalmente do funcionamento e do comportamento do sistema radicular (CHRISTINA et al., 2017), pois, além de promoverem a ancoragem e a sustentação da árvore, estes são meios importantes para absorção de água e nutrientes. Apesar de representar uma pequena porcentagem da biomassa de uma árvore, as raízes finas desempenham papel fundamental em sua ecofisiologia (Yuan & Chen, 2010), pelo fato de constituírem um dos principais meios para acessar os recursos do solo (KIRFEL et al., 2019).

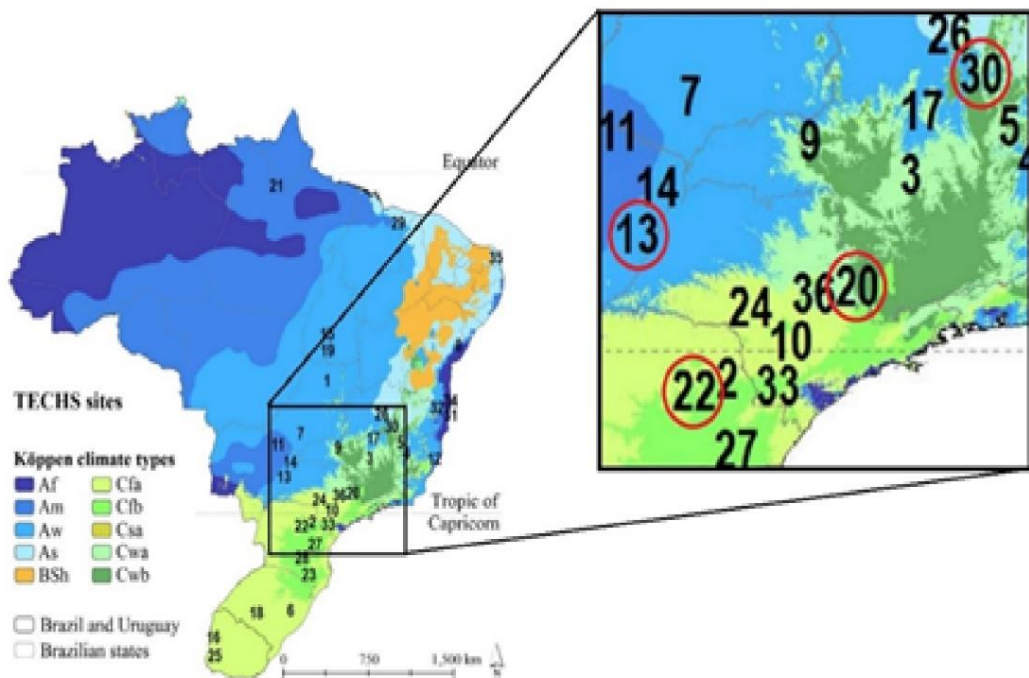
A compreensão da distribuição, funcionamento e a quantidade de raízes no solo torna-se crucial para o entendimento da fisiologia da planta, pois podem apresentar mecanismos para proteção em condições adversas, o que afeta diretamente suas funções. O conhecimento sobre o comportamento das raízes finas frente as mudanças climáticas limitam-se a camadas superficiais do solo. Apesar de baixa, a densidade radicular em solos profundos é crucial para aquisição de água e nutrientes, que posteriormente terão impacto na sobrevivência das plantas em período de seca. Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi determinar o efeito de condições climáticas contrastantes na dinâmica de raízes finas em profundidade para o genótipo *Eucalyptus urophylla*.

2.2 METODOLOGIA

Este estudo foi realizado em quatro sítios pertencentes a Rede experimental do Programa Cooperativo de Tolerância de Clones de *Eucalyptus* sp. a Estresses Hídricos, Térmicos e Abióticos (TECHS) (Fig. 1). Os sítios em estudo estão localizados em Bocaiuva – MG (S30), Três Lagoas – MS (S13), Mogi Guaçu - SP (S20) e Telêmaco Borba – PR (S22), englobando as principais regiões produtoras de *Eucalyptus* do Brasil (Ibá, 2020) (Fig. 1). Os sítios foram implantados entre dezembro de 2011 e março de 2012, em parcelas experimentais únicas, com 8 linhas composta de 30 árvores de *Eucalyptus urophylla*, espaçadas de 3 x 3 metros. A parcela foi dividida, como metade recebendo a chuva total e na outra metade foram instaladas calhas que removiam cerca de 33 % da chuva local. Todas as parcelas foram fertilizadas intensamente no primeiro ano de cultivo, sanando qualquer limitação nutricional, assim como herbicidas foram utilizados no controle de matocompetição.

Maiores detalhes sobre implantação e tratamentos silviculturais podem ser visualizados em (BINKLEY et al., 2020).

Figura 1 – Localização geográfica do sitio de Bocaiuva – MG (S30), Três Lagoas (S13), Mogi Guaçu – SP (S20) e Telêmaco Borba – PR (S22)



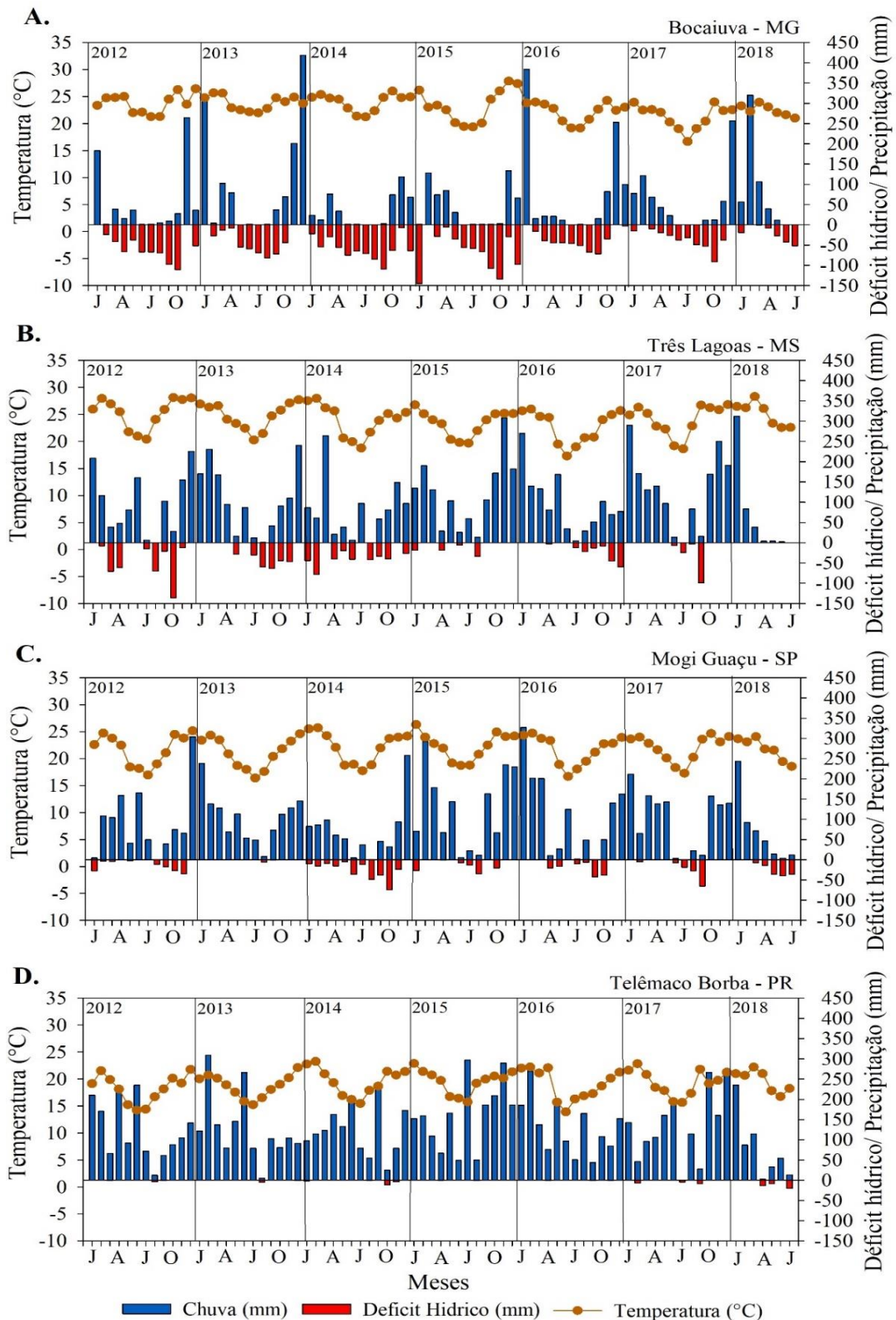
Fonte: Binkley et al., (2017) Adaptado.

As condições climáticas foram monitoradas durante todo o período de condução dos experimentos (2012 a 2018), através de estações meteorológicas instaladas próximas as áreas de estudo, e na ausência dessas, usou-se valores obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados faltantes foram preenchidos conforme demonstrado em (ELLI et al., 2019). Os valores de temperatura

mensal foram obtidos com base na média aritmética dos valores diários e de precipitação da soma dos valores diários. O déficit hídrico foi calculado com base no balanço sequencial em escala proposto por Thornthwaite e Mather (Camargo, 1962) usando uma capacidade de retenção de água específica dos solos.

Os sítios em estudo abrangem uma amplitude de precipitação anual de 800 mm, 540 mm de déficit hídrico e 5° na temperatura média do ar (Fig. 2). O local mais seco está situado em Bocaiuva – MG, com déficit hídrico chegando a 760 mm no ano de 2015, sendo este seguido pelo sítio localizado em Três Lagoas – MS, o qual apresenta as maiores temperaturas máximas para o período em estudo (36°C). De maneira oposta tem-se o sítio de Telêmaco Borba – PR, com temperatura média anual de 19°C e chuvas bem distribuídas ao longo do ano. Características climáticas intermediárias são encontradas para o sítio localizado em Mogi Guaçu – SP, déficit hídrico anual médio de 120 mm e temperatura média de 22°C.

Figura 2 – Caracterização climática para sítios localizados em Bocaiuva – MG (A) (S30), Três Lagoas (B) (S13), Mogi Guaçu – SP (C) (S20) e Telêmaco Borba – PR (D) (S22) para o período de janeiro de 2012 a julho de 2018



Os solos dos sítios em estudos são classificados como latossolo, sendo que os teores de argila, silte e areia foram determinados seguindo a metodologia proposta pela Embrapa (1997) e a capacidade de retenção de água de 0 a 2 metros por Stape et al., (2004). O sítio de Três Lagoas – MS se destaca pelos elevados teores de argila (77%), com conseqüente menor capacidade de armazenamento de água (87 L.m⁻²) (Tab. 1). De maneira oposta, tem-se o sítio localizado em Bocaiuva – MG o qual apresenta teores de argila em torno de 76% e capacidade de armazenamento de água de 225 L.m⁻².

Tabela 1 – Localização dos sítios em estudo e caracterização física dos solos para a profundidade de 0-40 cm

Sítio	Altitude m	Ordem do Solo	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	M. O. (g. L ⁻¹)	C. A. A (L . m ⁻²)
S30 (Bocaiuva –MG)	848	Latossolo	76	14	10	47,5	225
S13 (Três Lagoas – MS)	361	Latossolo	14	9	77	11,0	87
S20 (Mogi Guaçu – SP)	633	Latossolo	41	16	42	34,0	165
S22 (Telêmaco Borba – PR)	888	Latossolo	56	23	21	52,0	214

*M.O = Matéria orgânica; C.A.A = Capacidade de Armazenamento de Água.

A biomassa de raízes finas foi amostrada ao final da rotação (seis anos) em três pontos por parcela próximos a árvores que representavam o diâmetro médio da parcela até a profundidade máxima que se encontrava raízes finas. A amostragem foi realizada através de coleta de solo a cada 50 cm com auxílio de trado motorizado, acoplado com hastes de ferro que possuem em sua extremidade uma broca de 100mm de diâmetro e 40 cm de altura, responsável pela coleta do solo. As amostras de cada camada foram lavadas e as raízes finas, determinadas como aquelas de possuíam diâmetro inferior a 2mm, foram separadas com o auxílio de uma pinça (PINHEIRO et al., 2016). Foram consideradas apenas raízes vivas, determinadas através da cor e resistência, amarelas e flexíveis consideradas vivas e coloração escura e quebráveis as mortas. A biomassa de raízes finas (g.m⁻²) foi estimada a partir da determinação da densidade das raízes (massa seca das raízes em função da massa seca do solo) (g.kg⁻¹ de solo), e da densidade aparente do solo (massa seca do solo em função do volume).

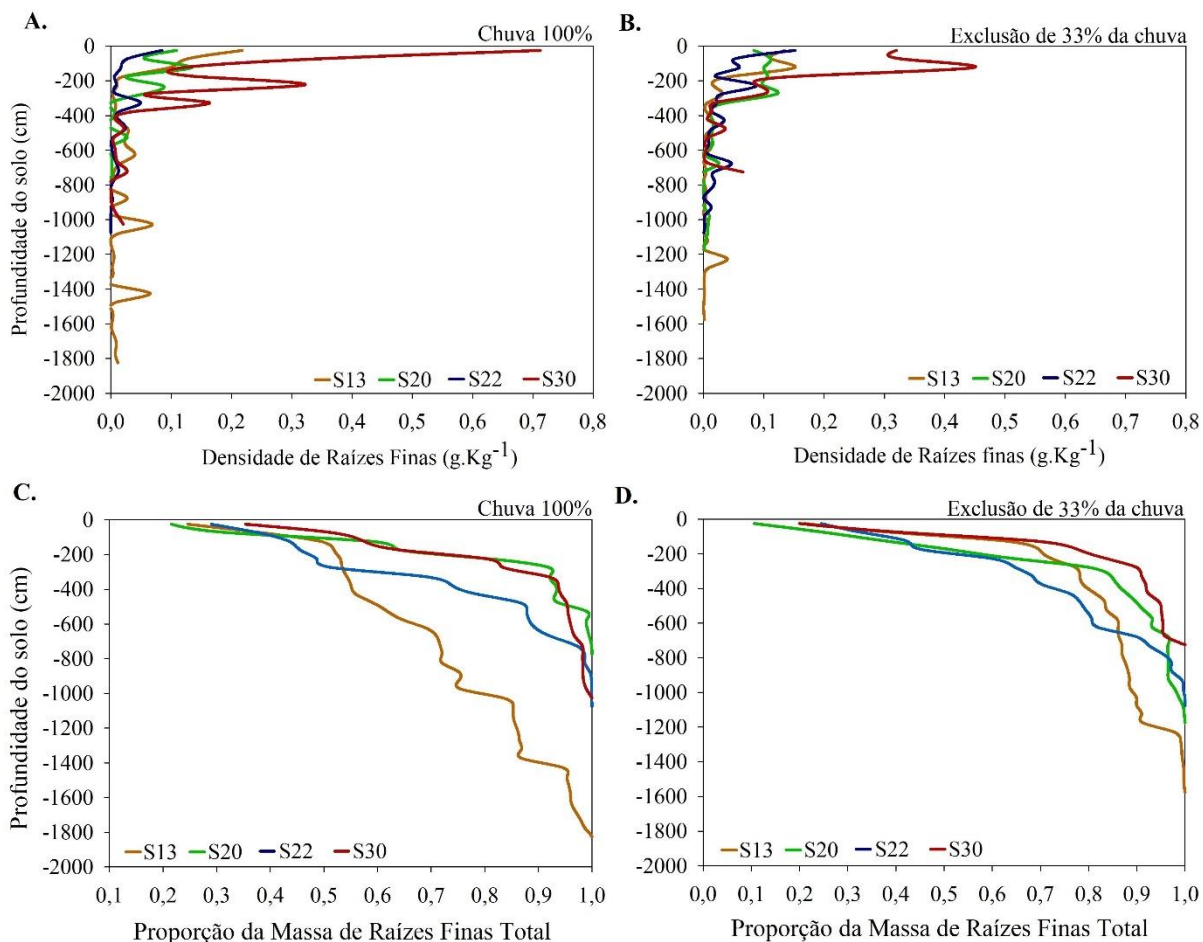
A biomassa seca acima do solo foi determinada através do corte de sete árvores para cada material genético (total de 56 árvores), as quais foram previamente selecionadas para cobrir a faixa de DAP (1,3 metros acima do solo) de cada parcela. As árvores colhidas foram divididas em madeira do tronco (sendo considerado casca e galhos) e folhas, os mesmos foram pesados no local de amostragem e sub-amostras representativas foram secas a 65°C até um peso constante para determinação da massa seca. Na ocasião também foram realizadas coletas de raízes grossas e toco, onde juntamente com a realização da biomassa aérea, foram feitas escavações para retirada dos tocos e raízes grossas das quatro plantas amostradas.

Avaliou-se as diferenças na densidade de raízes finas, altura de plantas, profundidade máxima de raízes finas, biomassa de folhas, madeira e raízes grossas. Os dados foram submetidos ao teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk). E posteriormente submetidos a análise de variância (ANOVA) para verificar a existência de interação entre sítio e nível de precipitação. Na presença de significância os dados foram comparados mediante o teste de Tukey a 5% de probabilidade ($P \leq 0,05$). Para execução das análises estatísticas, foram utilizados os programas estatísticos *R studio* e *SigmaPlot 12.5*.

2.3 RESULTADOS

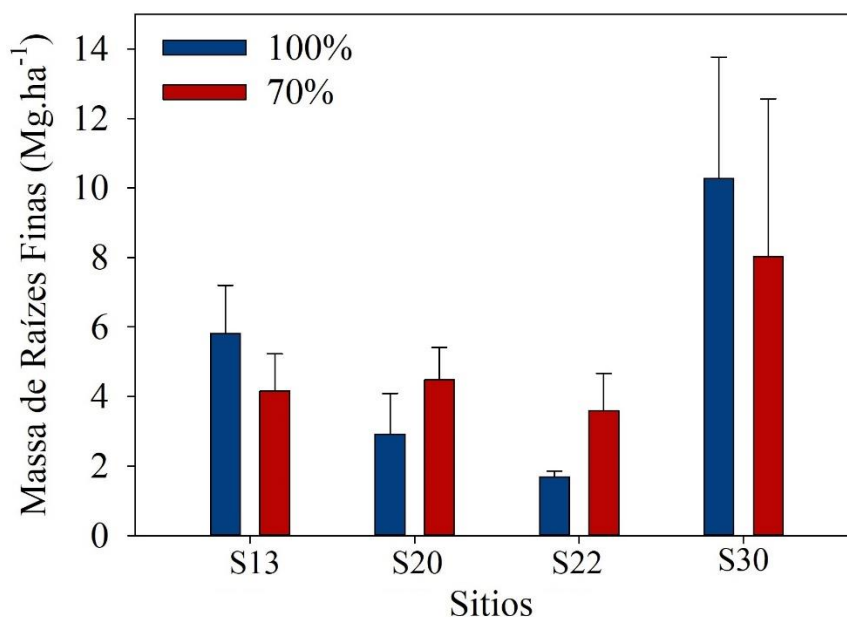
Densidades de raízes finas elevadas foram observadas nas camadas superficiais do solo (até -50 cm), com valores situando-se entre 0,08 a 0,71 g. Kg⁻¹ (Fig. 3) em ambos os níveis de precipitação. Comportamento discrepante em função da distribuição de raízes finas é verificado para o genótipo A1 no sítio de Bocaiuva – MG, no qual os valores de densidade de raízes finas variaram 0,31 a 0,71 g. Kg⁻¹ para níveis de precipitação total e exclusão de chuva, reduzindo drasticamente após esta camada. Já para as demais localidades a distribuição de raízes reduziu em função do decréscimo do déficit hídrico do solo em 69, 85 e 88 % para os sítios de Três Lagoas – MS, Mogi Guaçu – SP e Telêmaco Borba – PR, respectivamente para o nível de precipitação total.

Figura 3 – Distribuição de raízes finas (A e B) e Proporção acumulada da massa de raízes finas (C e D) até a profundidade máxima atingida encontrada para o genótipo *Eucalyptus urophylla* quando cultivados em Três Lagoas – MS (S13), Mogi Guaçu – SP (S20), Telêmaco Borba – PR (S22) e Bocaiuva – MG (S30) e Telêmaco Borba (PR) sob dois regimes hídricos aos 6 anos. Valores médios para as três posições independentes



Os valores de massa de raízes finas para o *Eucalyptus urophylla* (A1) variaram de 1,69 a 10,27 Mg. ha⁻¹ entre os locais e níveis de precipitação (Fig. 4). Os maiores valores de massa de raízes finas foram obtidos no sítio de Bocaiuva – MG, para o tratamento com 100% da precipitação (10,27 Mg.ha⁻¹), ocorrendo uma redução de 21,9 % na massa de raízes finas no sistema de exclusão de chuva. Embora o sítio de Bocaiuva - MG apresente os maiores valores de massa de raízes finas, o sítio de Três Lagoas - MS detém o maior aumento da desta variável em função do efeito da exclusão de chuva (28,4 %).

Figura 4 – Média da massa de raízes finas para o genótipo *Eucalyptus urophylla* (A1) quando cultivados em Três Lagoas – MS (S13), Mogi Guaçu – SP (S20), Telêmaco Borba – PR (S22) e Bocaiuva – MG (S30) e Telêmaco Borba (PR) sob dois regimes hídricos (100 e 70% da precipitação) aos 6 anos. As barras verticais representam o desvio padrão para a massa de raízes finas dos tratamentos

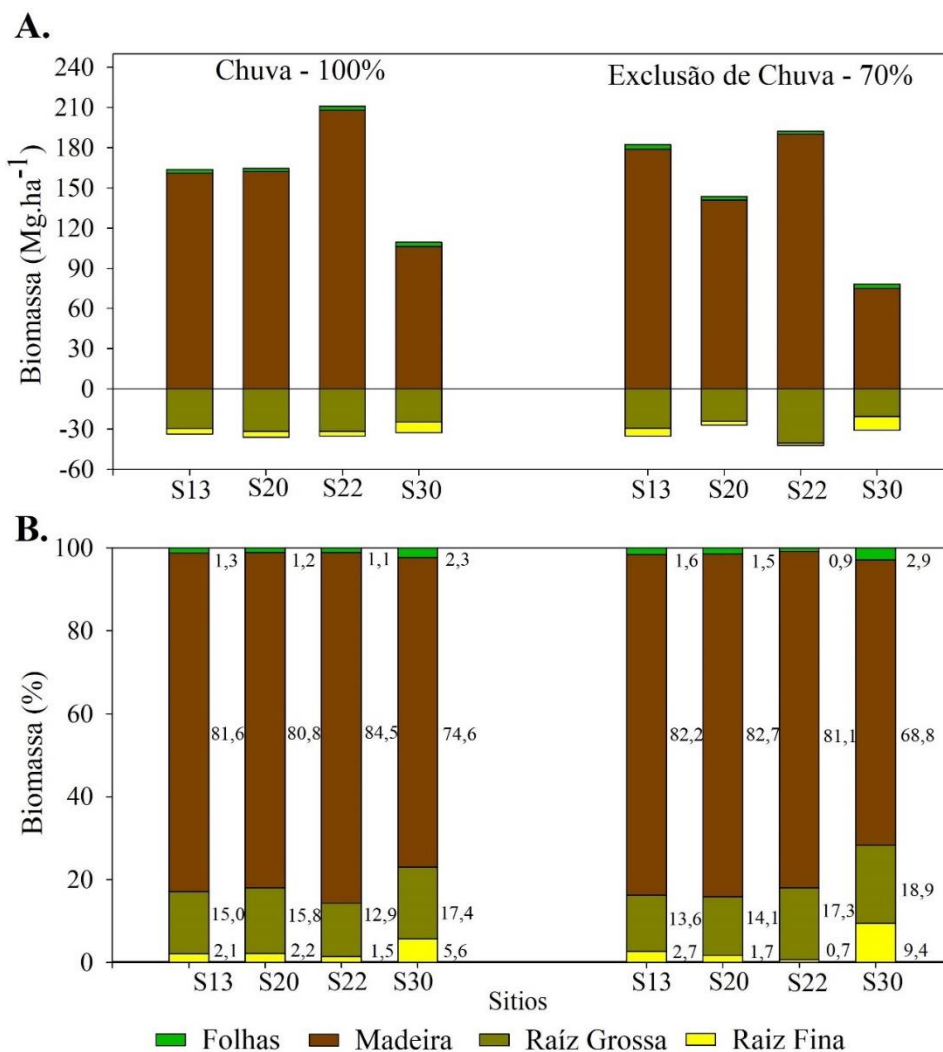


Em contrapartida, para os sítios de Telêmaco Borba – PR e Mogi Guaçu – SP o genótipo A1 aumentou a biomassa de raízes finas em 113 e 54% respectivamente em função do sistema de exclusão de chuva. Independentemente do nível de precipitação os menores valores para esta variável foram visualizados em Telêmaco Borba – PR, sendo este de 1,69 Mg. ha⁻¹ para o sistema com 100% da precipitação e 3,59 Mg. ha⁻¹ para o tratamento com exclusão de chuva.

A exclusão de chuva proporcionou menor produtividade de biomassa para os sítios de Bocaiuva – MG (23%), Mogi Guaçu – SP (15%) e Telêmaco Borba – PR (5%), comportamento este não evidenciado em Três Lagoas – MS, cuja produtividade total de biomassa aumentou em 10% (Fig. 5). Maiores teores relativos de biomassa foram verificados em Telêmaco Borba – PR aos seis anos para o genótipo A1, sendo 246,13 e 234,48 Mg. ha⁻¹ para os níveis de precipitação total e exclusão de chuva respectivamente (Fig. 5). Porém com o aumento dos valores de déficit hídrico do solo

(<600 mm) a produtividade dos sítios foi reduzida em até 53%, como verificado em Bocaiuva-MG.

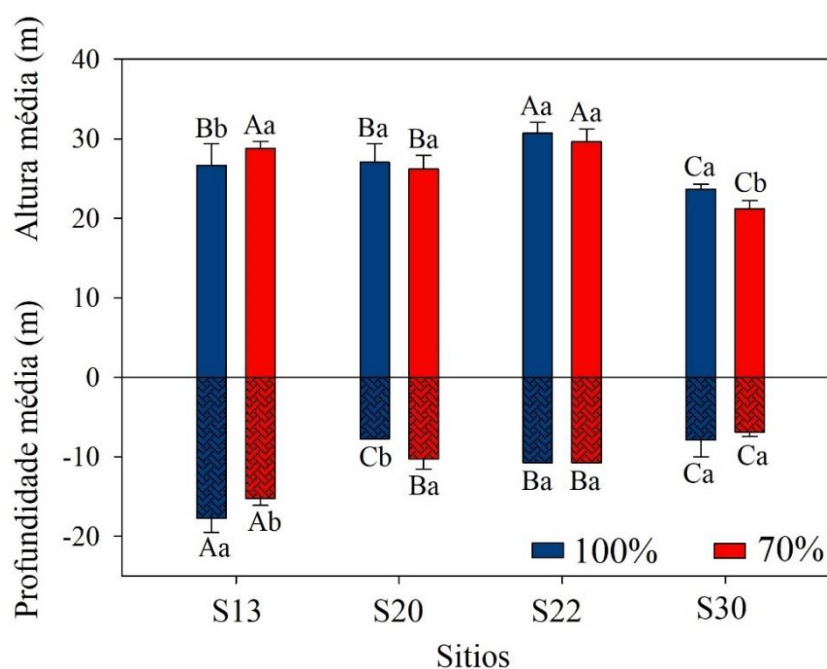
Figura 5 – Biomassa para os componentes madeira (fuste, galho e casca), folhas, raízes grossas (<2mm) e raízes finas (<1mm) para o genótipo *Eucalyptus urophylla* quando cultivados em Três Lagoas – MS (13 TL), Mogi Guaçu – SP (20 MG), Telêmaco Borba – PR (22 TB) e Bocaiuva – MG (30 BC) e Telêmaco Borba (PR) sob dois regimes hídricos aos 6 anos



A relação entre a profundidade máxima de raízes finas e a altura das plantas é extremamente variável entre os ambientes de cultivo (Fig. 6). Para o sitio de Três Lagoas – MS a profundidade de raízes finas corresponde a 67 e 53% da altura total da parte aérea para os níveis de precipitação total e exclusão de chuva

respectivamente. Todavia para os demais ambientes essa relação se manteve entre 29 e 39% independentemente do nível de precipitação.

Figura 6 – Média da altura das árvores e da profundidade máxima alcançada pelas raízes finas (em metros) para o genótipo *Eucalyptus urophylla* quando cultivados em Três Lagoas – MS (S13), Mogi Guaçu – SP (S20), Telêmaco Borba – PR (S22) e Bocaiuva – MG (S30) e Telêmaco Borba – PR (S22) sob dois regimes hídricos aos 6 anos. As barras verticais representam o desvio padrão para a densidade de raízes finas dos tratamentos. *Interação significativa para as variáveis sítio e exclusão de chuva. Letras maiúsculas comparam os sítios dentro do mesmo nível de precipitação e as minúsculas os níveis de precipitação dentro do mesmo sítio



A maior profundidade de enraizamento para o genótipo A1 foi obtida no sítio de Três Lagoas – MS, com as raízes finas chegando a 17,8 e 15,3 m para os tratamentos sem e com exclusão de chuvas respectivamente (Fig. 6). Os valores encontrados para este sítio são 55% superior aos menores valores de profundidade máxima de enraizamento encontradas em Bocaiuva – MG na presença (7,9 m) e ausência (6,9 m) do sistema de redução de chuva. Encontramos uma relação linear significativa entre a profundidade máxima de enraizamento e os teores de areia dos solos de

cultivo, no qual o sítio de Três Lagoas – MS apresenta a textura do solo 77% arenosa (Tabela 1) (Fig. 7). Os demais sítios por sua vez, apresentaram teor de areia entre 10 e 40 %, sendo que nestas características a profundidade máxima de raízes finas situou-se entre 8 e 12 metros.

Figura 7 – Relação teor de areia (variável independente) x profundidade máxima de raízes finas (variável dependente) para o genótipo *Eucalyptus urophylla* quando Bocaiuva – MG (S30), Três Lagoas – MS (S13), Mogi Guaçu – SP (S20) e Telêmaco Borba – PR (S22) com 100% da chuva (A) e 70%(B). As barras verticais representam o desvio padrão

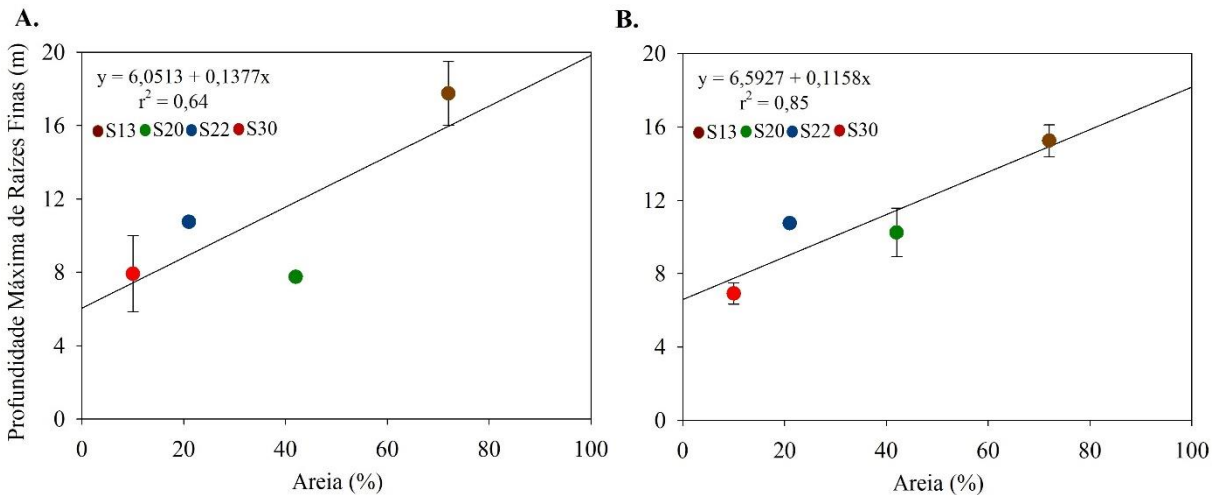
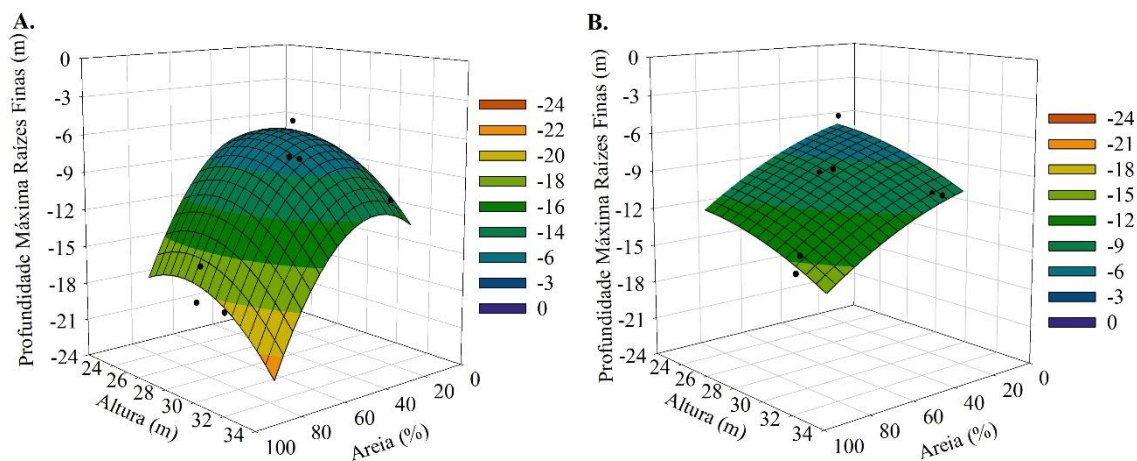


Figura 8 – Profundidade máxima atingida pelas raízes finas para o genótipo *Eucalyptus urophylla* quando cultivados em Três Lagoas – MS (13 TL), Mogi Guaçu – SP (20 MG), Telêmaco Borba – PR (22 TB) e Bocaiuva – MG (30 BC) e Telêmaco Borba (PR) aos 6 anos em função da altura da planta e teor de areia no solo para os níveis de precipitação total (A) e exclusão de chuva (B)



2.4 DISCUSSÃO

Nota-se elevada concentração de raízes finas nas camadas superficiais dos diversos solos florestais avaliados, independentemente das condições edafoclimáticas do local (Fig. 3). Tal comportamento é resultante de uma série de fatores ecológicos, como: maior acúmulo de matéria orgânica, menor resistência do solo a penetração de raízes, maior disponibilidade de água (SCHENK, 2008), dentre outros. Além destes fatores, por se tratarem de solos agrícolas, a disponibilidade de nutriente é maior, em decorrência da fertilização em estádios iniciais do plantio, assim como a decomposição da serapilheira ao longo do crescimento da planta (LACLAU et al., 2003).

Apesar da biomassa radicular se concentrar nas camadas superficiais, neste estudo pode-se notar que a distribuição radicular ao longo do perfil do solo é distinta, em função da disponibilidade hídrica e das propriedades físicas do solo (Fig. 3). Em locais onde o déficit hídrico anual foi superior a 200mm como é o caso de Bocaiuva-MG e Três Lagoas – MS, entretanto com solos apresentando texturas diferentes, a distribuição das raízes finas foi distinta em ambos os locais. Isto ocorre porque, o *Eucalyptus urophylla* adota diferentes estratégias para maximizar a absorção de água

e nutrientes, aumentando ou reduzindo a densidade e o comprimento radicular (BRISTOW; CAMPBELL; CALISSENDORFF, 1984).

Além da disponibilidade hídrica, fatores inerentes as texturas do solo demonstraram influenciar a disposição das raízes finas ao longo do perfil do solo (Fig. 7) em tais condições a dimensão dos poros afetam a condutividade hidráulica e conseqüentemente a capacidade de retenção da umidade (MCDOWELL et al., 2008). Em locais com textura argilosa como é o caso de Bocaiuva – MG, o sistema radicular se concentrou em profundidades inferiores a 10m (Fig. 6), o que segundo Sperry & Hacke, (2002), ocorre devido ao fato dos espaços entre os poros serem menores, o que dificulta a penetração das raízes finas para camadas mais profundas.

Em Três Lagoas – MS, local onde a textura do solo tende ao arenoso (77% de areia), a disposição das raízes finas alcançou profundidades mais elevadas, o que é decorrente do espaçamento mais elevado entre os macroporos, que conseqüentemente apresentam menor resistência mecânica para as raízes (SCHYMANSKI et al., 2008). Neste aspecto, plantas em solos arenosos naturalmente tendem a desenvolver raízes em camadas profundas devido à baixa retenção de umidade dos solos arenosos (SAXTON; RAWLS, 2006). A distribuição de raízes finas em camadas profundas do solo é extremamente importante durante secas prolongadas, pois são responsáveis por manter o abastecimento de água necessários para o funcionamento dos processos fisiológicos (CHRISTINA et al., 2017).

De forma geral a alocação de biomassa para os órgãos das plantas é influenciada pela disponibilidade de recursos mais limitante (POORTER et al., 2012), ou seja, em ambientes com ótimas condições para o desenvolvimento da planta, o padrão de alocação de recursos (biomassa), torna-se “ideal” tanto para a parte aérea quanto radicular. Com a redução da disponibilidade hídrica, as plantas tendem a priorizar a formação de raízes finas, com intuito de melhorar o acesso a água (MEDINA et al., 2002), o que é constatado neste estudo (Fig. 4), logo, maior enraizamento remete a maior capacidade de explorar a água disponível.

Florestas plantadas em sítios com maior disponibilidade hídrica e nutricional, demonstraram maiores produtividades (Fig.5), o que decorre da maior alocação de carbono para a produção de madeira, em detrimento dos componentes abaixo do solo (CAMPOE et al., 2020). O *Eucalyptus urophylla* apresentou elevada plasticidade na partição de biomassa em função da disponibilidade hídrica dos sítios, através de alteração na proporção de carbono alocado abaixo do solo, em detrimento da água

disponível. Essa plasticidade na exploração do solo por raízes finas ao longo do crescimento das árvores desempenha um papel importante na maximização do uso de recursos nessas plantações de crescimento rápido (LACLAU et al., 2013). Tais resultados permitem auxiliar na implementação de novas estratégias com o intuito de melhorar a adaptação dos maciços florestais ao ambiente, e conseqüentemente obter maiores produtividades.

2.5 CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou as diferentes estratégias de enraizamento adotadas pelo *E. urophylla* em função dos sítios de cultivo, através de uma amplitude na massa de raízes finas de 1,7 a 10,3 Mg.ha⁻¹, com 50% da massa de raízes nos primeiros 100 cm do solo e conseqüente redução exponencial.

Os valores de biomassa de raízes finas aumentaram em função da redução da disponibilidade hídrico do solo, sendo que, na presença do sistema de exclusão de chuva, o *E. urophylla*, apresentou aumentos na biomassa de raízes finas para os sítios com déficit hídrico acima de 300 mm e redução para os ambientes com deficiência hídrica inferior.

Raízes finas atingiram profundidade de enraizamento entre 6,9 a 17,7 metros aos seis anos, sendo que a máxima profundidade foi encontrada no sítio com elevados teores de areia no solo. Os resultados encontrados neste estudo podem auxiliar os programas de melhoramento florestal na seleção de áreas para o cultivo do *E. urophylla*, assim como fornecer melhores insights para a otimização de modelos de predição baseados em processos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. C.; SIGGINS, A.; BATISTA, T. R.; BEADLE, C.; FONSECA, S.; LOOS, R. Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on Eucalyptus plantation production with 3-PG, a process-based growth model. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1730–1740, 2010.

BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C. A.; CARNEIRO, R. L.; STAPE, J. L. Variation in whole-rotation yield among Eucalyptus genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS project. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 462, n. December 2019, p. 117953, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117953>>

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, n. September, p. 271–283, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>>

BINKLEY, D.; STAPE, J. L.; RYAN, M. G. Thinking about efficiency of resource use in forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, n. 1–2, p. 5–16, 2004.

BOOTH, T. H. Eucalypt plantations and climate change. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 28–34, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.004>>

BRISTOW, K. L.; CAMPBELL, G. S.; CALISSENDORFF, C. The Effects of Texture on the Resistance to Water Movement within the Rhizosphere. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 2, p. 266–270, 1984.

CAMARGO, A. P. DE. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, 1962.

CAMPOE, O. C.; ALVARES, C. A.; CARNEIRO, R. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; HUBBARD, R. M.; STAHL, J.; MOREIRA, G.; MORAES, L. F.; STAPE, J. L. Climate and genotype influences on carbon fluxes and partitioning in Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 475, n. May, 2020.

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**, Oxford, v. 31, n. 2, p. 509–519, 2017.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; DE FREITAS, C. H.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C. A. Intercomparison of structural features and performance of Eucalyptus simulation models and their ensemble for yield estimations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 450, n. July, p. 117493, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117493>>

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Rio de Janeiro, Brazil, EMBRAPA (1997), p. 212

HE, J.; SODEN, B. J. A re-examination of the projected subtropical precipitation decline. **Nature Climate Change**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 53–57, 2017.

IBA. Instituto Brasileiro de Árvores - **Relatório IBÁ 2020**, 2020. São Paulo: Indústria Brasileira de Árvores. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>>.

KIRFEL, K.; HEINZE, S.; HERTEL, D.; LEUSCHNER, C. Effects of bedrock type and soil chemistry on the fine roots of European beech – A study on the belowground plasticity of trees. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 444, n. April, p. 256–268, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.04.022>>

LACLAU, J. P.; DA SILVA, E. A.; RODRIGUES LAMBAIS, G.; BERNOUX, M.; LE MAIRE, G.; STAPE, J. L.; BOUILLET, J. P.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; JOURDAN, C.; 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**, [s. l.], v. 4, n. JUL, p. 1–12, 2013.

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**, London, v. 91, n. 7, p. 879–892, 2003.

LITTON, C. M.; RAICH, J. W.; RYAN, M. G. Carbon allocation in forest ecosystems. **Global Change Biology**, Oxford, v. 13, n. 10, p. 2089–2109, 2007.

MCDOWELL, N.; ALLEN, C. D.; ANDERSON-TEIXEIRA, K.; BRANDO, P.; BRIENEN, R.; CHAMBERS, J.; CHRISTOFFERSEN, B.; DAVIES, S.; DOUGHTY, C.; DUQUE, A.; ESPIRITO-SANTO, F.; FISHER, R.; FONTES, C. G.; GALBRAITH, D.; GOODSMAN, D.; GROSSIORD, C.; HARTMANN, H.; HOLM, J.; JOHNSON, D. J.; KASSIM, A. R.; KELLER, M.; KOVEN, C.; KUEPPERS, L.; KUMAGAI, T.; MALHI, Y.; MCMAHON, S. M.; MENCUCCINI, M.; MEIR, P.; MOORCROFT, P.; MULLER-LANDAU, H. C.; PHILLIPS, O. L.; POWELL, T.; SIERRA, C. A.; SPERRY, J.; WARREN, J.; XU, C.; XU, X. Drivers and mechanisms of tree mortality in moist tropical forests. **New Phytologist**, Cambridge, v. 219, n. 3, p. 851–869, 2018.

MCDOWELL, N.; POCKMAN, W. T.; ALLEN, C. D.; BRESHEARS, D. D.; COBB, N.; KOLB, T.; PLAUT, J.; SPERRY, J.; WEST, A.; WILLIAMS, D. G.; YEPEZ, E. A. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do some plants survive while others succumb to drought? **New Phytologist**, Cambridge, v. 178, n. 4, p. 719–739, 2008.

MEDINA, C. D. C.; NEVES, C. S. V. J.; FONSECA, I. C. de B.; TORRETI, A. F. Crescimento radicular e produtividade de cana-de-açúcar em função de doses de vinhaça em fertirrigação. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 23, n. 2, p. 179, 2002.

PINHEIRO, R. C.; DE DEUS, J. C.; NOUVELLON, Y.; CAMPOE, O. C.; STAPE, J.

L.; ALÓ, L. L.; GUERRINI, I. A.; JOURDAN, C.; LACLAU, J. P. A fast exploration of very deep soil layers by Eucalyptus seedlings and clones in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 366, p. 143–152, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.02.012>>

POORTER, H.; NIKLAS, K. J.; REICH, P. B.; OLEKSYN, J.; POOT, P.; MOMMER, L. Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control. **New Phytologist**, Cambridge, v. 193, n. 1, p. 30–50, 2012.

RYAN, M. G.; STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA, C. R.; SILVA, S. R.; HAKAMADA, R. E.; FERREIRA, J. M.; LIMA, A. M. N.; GAVA, J. L.; LEITE, F. P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J. M.; SILVA, G. G. C. Factors controlling Eucalyptus productivity: How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1695–1703, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.013>>

SANDS, R.; MULLIGAN, D. R. Water and nutrient dynamics and tree growth. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 30, n. 1–4, p. 91–111, 1990.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 5, p. 1569–1578, 2006.

SCHENK, H. J. Soil depth, plant rooting strategies and species' niches. **New Phytologist**, Cambridge, v. 178, p. 225–227, 2008.

SCHYMANSKI, S. J.; SIVAPALAN, M.; RODERICK, M. L.; BERINGER, J.; HUTLEY, L. B. Hydrology and Earth System Sciences An optimality-based model of the coupled soil moisture and root dynamics. **Hydrol. Earth Syst. Sci**, [s. l.], v. 12, p. 913–932, 2008. Disponível em: <www.hydrol-earth-syst-sci.net/12/913/2008/>

SPERRY, J. S.; HACKE, U. G. Desert shrub water relations with respect to soil characteristics and plant functional type. **Functional Ecology**, Oxford, v. 16, n. 3, p. 367–378, 2002.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, n. 1–2, p. 17–31, 2004.

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. de 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, n. 9, p. 1684–1694, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.012>>

TRUMBORE, S. Carbon respired by terrestrial ecosystems - Recent progress and challenges. **Global Change Biology**, Oxford, v. 12, n. 2, p. 141–153, 2006.

VOSE, J. M.; SWANK, W. T. Effects of long-term drought on the hydrology and growth of a white pine plantation in the southern Appalachians. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 64, n. 1, p. 25–39, 1994.

WILLIAMS, A. P.; ALLEN, C. D.; MACALADY, A. K.; GRIFFIN, D.; WOODHOUSE, C. A.; MEKO, D. M.; SWETNAM, T. W.; RAUSCHER, S. A.; SEAGER, R.; GRISSINO-MAYER, H. D.; DEAN, J. S.; COOK, E. R.; GANGODAGAMAGE, C.; CAI, M.; MCDOWELL, N. G. Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. **Nature Climate Change**, [s. l.], v. 3, n. 3, p. 292–297, 2013.

YUAN, Z. Y., CHEN, Y. H. Fine root biomass, production, turnover rates, and nutrient contents in boreal forest ecosystems in relation to species, climate, fertility, and stand age: literature review and meta-analyses. **Critical Reviews in Plant Science**, Boca Raton, v.29, p.204-221, 2010.

CAPITULO 3

OS PADRÕES DE ENRAIZAMENTO PROFUNDO DE *Eucalyptus* spp SÃO ALTERADOS COM A IDADE

RESUMO

A melhor compreensão da dinâmica de raízes finas em camadas profundas do solo ao longo da rotação para genótipos de *Eucalyptus* spp cultivados em ambientes com condições climáticas contrastantes é de extrema importância para o manejo dos plantios florestais em um contexto de mudanças climáticas. O objetivo deste trabalho foi identificar os padrões de crescimento de raízes adotados pelos genótipos em função das condições climáticas contrastantes, além de verificar se esses padrões são alterados do meio (3 anos) para o fim da rotação (6 anos). Raízes finas (diâmetro inferior a 2mm) foram analisadas até profundidade total em dois clones: *Eucalyptus urophylla* (A1) e o *E. grandis* x *E. camaldulensis* (C3) aos três e seis anos. A dinâmica de raízes finas foi estudada através de amostragens com trato mecanizado em três distintos pontos por parcela. Maiores amplitudes nos valores de raízes finas são verificadas para ambos os genótipos quando cultivados no ambiente tropical, com valores variando de 0 a 0,8 g. Kg⁻¹ para o genótipo A1 e 0 a 0,4 g. Kg⁻¹ para o C3. Em condições climáticas tropicais, maiores valores para esta variável foram observados aos seis anos, com aumento de 18% para o genótipo A1 e 47% para o C3 (Figura 4). Já em clima subtropical, comportamentos distintos foram identificados, no qual o genótipo A1 reduziu a biomassa de raízes em até três vezes e o C3 manteve os valores do meio para o fim da rotação. Pode-se concluir que, as raízes finas são estimuladas de forma distinta, quando submetidas a climas contrastantes, além de serem impactadas com o aumento da idade da planta. Maior densidade de raízes finas foram verificadas nos primeiros centímetros do solo em ambos os sítios de cultivo e idades amostradas.

Palavras chaves: Raízes finas; Idade de cultivo; Deficiência hídrica; Alocação de biomassa.

CHAPTER 3

DEEP ROOTING PATTERNS OF *Eucalyptus* spp CHANGE WITH AGE

ABSTRACT

A better understanding of the dynamics of thin roots in deep soil layers during rotation for *Eucalyptus* spp genotypes cultivated in environments with contrasting climatic conditions is extremely important for the management of forest plantations in a context of climate change. The objective of this work was to identify the rooting patterns adopted by the genotypes according to the contrasting climatic conditions, in addition to verifying whether these patterns are altered from the medium to the end of the rotation. Thin roots (diameter less than 2mm) were analyzed up to 13 m deep in two clones: *Eucalyptus urophylla* (A1) and *E. grandis* x *E. camaldulensis* (C3) at three and six years old. The dynamics of fine roots was studied through sampling with mechanized tract at three different points per plot. Greater amplitudes in the values of fine roots are verified for both genotypes when cultivated in the tropical environment, with values ranging from 0 to 0.8 g. Kg⁻¹ for genotype A1 and 0 to 0.4 g. Kg⁻¹ for C3. In tropical climatic conditions, higher values for this variable were observed at six years of age, with an increase of 18% for genotype A1 and 47% for C3 (Figure 4). In the subtropical climate, different behaviors were identified, in which the A1 genotype reduced the root biomass by up to three times and the C3 maintained the values of the medium to the end of the rotation. It can be concluded that thin roots are stimulated differently when subjected to contrasting climates, in addition to being impacted by the increase in the plant's age. Higher density of fine roots was verified in the first centimeters of the soil in both cultivation sites and sampled ages.

Key words: Fine roots; Cultivation age; Water deficiency; Allocation of biomass.

3.1 INTRODUÇÃO

Dentre as espécies florestais mais plantadas no Brasil, destaca-se o gênero *Eucalyptus* sp. o que é resultante de sua larga utilização econômica, crescimento rápido, com baixa idade de corte, sendo este em torno de 6 a 8 anos (BOOTH, 2013). Entretanto, apesar de possuir uma vasta gama de espécies com boa adaptação a distintas condições climáticas (STAPE et al., 2004), tem-se notado estagnação de seu incremento volumétrico, e até mesmo declínio em algumas localidades (BINKLEY et al., 2017). O que torna importante, o estudo de adaptação e comportamento desta espécie em distintos locais de plantio.

O conhecimento da biomassa de raízes, assim como sua distribuição no solo é importante no entendimento das relações existentes entre a parte aérea e características edáficas (SAINJU; GOOD, 1993), principalmente na questão de adaptação. As raízes possuem grande importância para o desenvolvimento da planta, seja na absorção de nutrientes, participação no ciclo hidrológico, características inerentes a rizosfera, entre outros (KLEIDON; HEIMANN, 2000).

Tais funções são exercidas pelas raízes finas ou grossas, onde está última, possui tem maior ligação com a fixação da planta no solo, transporte e armazenamento de nutrientes e água (ADDO-DANSO; PRESCOTT; SMITH, 2016). Apesar de boa parte do sistema radicular ser constituído de raízes grossas (VOGT; VOGT; BLOOMFIELD, 1998), são as raízes finas que possuem maior importância nos ciclos biogeoquímicos, contribuindo com mais de 50% da produtividade primária líquida total das florestas (ADDO-DANSO; PRESCOTT; SMITH, 2016; NAVROSKI et al., 2010).

A distribuição espacial das raízes finas geralmente está correlacionada com a disponibilidade hídrica e o teor de nutrientes do solo (LEUSCHNER et al., 2004). Além destes, uma série de outros estudos demonstraram que tais fatores também possuem papel importante na produção de raízes finas assim como na taxa de mortalidade (HENDRICK; PREGITZER, 1997; NADELHOFFER, 2000; PREGITZER et al., 2000). Dado o cenário atual, com expansões para novas áreas plantadas, alterações nos padrões climáticos e necessidade de se aumentar o incremento volumétrico, torna-se, importante a compreensão do feedback das estratégias de investimento radicular destas plantas a estes locais. Pois, compreender o padrão de distribuição de raízes

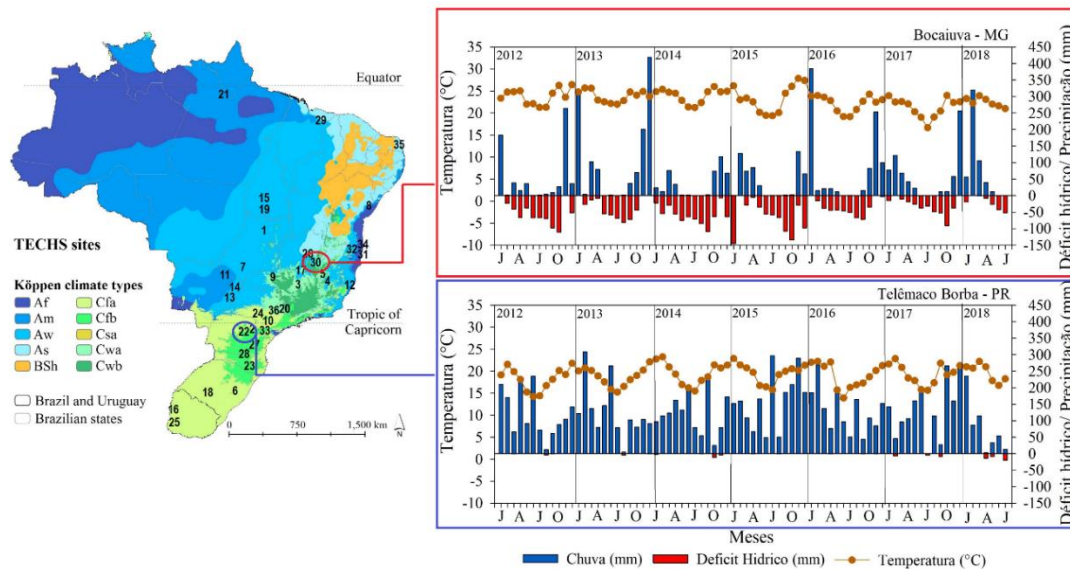
finas no momento de implantação e ao longo do tempo pode ser crucial para o estabelecimento desta espécie florestal.

Aliado a isto, dado a complexidade dos padrões de alocação de biomassa abaixo do solo, associado a dificuldade do sistema de amostragem, denotam que as informações sobre este componente abaixo do solo estão atrasadas em relação a biomassa acima do solo. Logo, o objetivo deste trabalho foi identificar os padrões de enraizamento adotados pelos genótipos em função das condições climáticas contrastantes, além de verificar se esses padrões são alterados do meio para o fim da rotação.

3.2 METODOLOGIA

As amostragens foram realizadas em dois sítios pertencentes a Rede Experimental do Programa Cooperativo de Tolerância de Clones de *Eucalyptus* sp. a Estresses Hídricos, Térmicos e Abióticos (TECHS) (Fig. 1). Os experimentos foram implantados seguindo a técnica de cultivo mínimo no final de 2011 nos municípios de Bocaiuva – MG (S30) e Telêmaco Borba – PR (S22), em parcelas padronizadas com oito linhas de 15 plantas cada e espaçamento entre árvores de 3 x 3 metros. As árvores foram fertilizadas durante o primeiro ano de cultivo para corrigir e evitar quaisquer problemas nutricionais, herbicidas foram utilizados no controle de espécies invasoras. Maiores detalhes sobre os tratamentos culturais aplicados podem ser visualizados em Binkley *et al.*, (2017).

Figura 1 – Distribuição espacial dos locais do Projeto TECHS e localização dos locais em estudo (círculos vermelhos). Temperatura, precipitação e déficit hídrico durante o período de estudo para os sítios localizados em Bocaiuva - MG (S30) e Telêmaco Borba - PR (S22)



Fonte: Binkley et al., (2017) Adaptado.

O sítio de Bocaiuva – MG (S30) apresenta clima tropical, temperaturas médias anuais em torno de 23,1°C e precipitação de 726 mm ao ano (Fig. 1). Já em Telêmaco Borba – PR (S22), possui temperaturas médias anuais amenas (19,1°C) e chuvas bem distribuídas ao longo do ano (1590mm.ano⁻¹). Os dados utilizados na caracterização climática dos sítios em estudo são provenientes de estações meteorológicas instaladas próximas aos experimentos e na ocorrência de falhas, as mesmas foram preenchidas conforme metodologia descrita em Elli *et al.*, (2019).

A classificação do solo destes locais é o latossolo (STAFF, 1999), com teores de areia de 10 e 21% para o sítio de Bocaiuva-MG e Telêmaco Borba – PR respectivamente (Tab. 1) (EMBRAPA, 1997).

Tabela 1 – Localização dos sítios em estudo e caracterização física dos solos para a profundidade de 0- 40 cm

Sítio	Altitude m	Ordem do Solo	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	M. O. (g.L ⁻¹)	C.A.D (L.m ⁻²)
Bocaiuva–MG (S30)	848	Latossolo	76	14	10	47,5	225
Telêmaco Borba–PR (S22)	888	Latossolo	56	23	21	52,0	214

Os genótipos A1 (*E. urophylla*) e C3 (*E. grandis* × *E. camaldulensis*) são comumente cultivados pelas empresas florestais e apresentam características distintas de crescimento em função dos ambientes de seleção. O A1 é um dos clones mais plantados no Brasil, em função da sua alta produtividade em diversas regiões brasileiras (CALDEIRA et al., 2020). O clone C3 foi selecionado no estado de Minas Gerais, sendo cultivado principalmente em regiões tropicais, pois, o baixo teor de crescimento repercutem em maior resistência a seca (HUBBARD et al., 2020).

As amostragens aéreas e radiculares foram realizadas nos anos de 2014 e 2018, ou seja, no meio e final da rotação, quando os plantios apresentavam três e seis anos. A biomassa do sistema radicular foi dividida em raízes finas, as quais apresentavam diâmetro inferior a 2mm, e as demais como raízes grossas (raízes com diâmetro superior a 2mm e o toco) (PINHEIRO et al., 2016). A coleta de raízes finas foi realizada em três diferentes pontos por parcela, próximos a árvores que representavam o diâmetro médio da parcela, até a profundidade máxima em que se encontrou raízes finas, com retiradas de amostras a cada 50cm.

As amostras foram retiradas com o auxílio de trado motorizado acoplado com hastes de ferro que possuem em sua extremidade uma broca de 100mm de diâmetro e 40 cm de altura. A biomassa de raízes finas (g.m²) foi estimada a partir da determinação da densidade das raízes (massa seca de raízes em função da massa seca do solo) (g.kg⁻¹), e da densidade aparente do solo (massa seca do solo em função do volume).

A biomassa seca acima do solo aos três anos foi realizada em seis indivíduos para cada combinação de genótipo e local, os quais foram selecionados para representar o diâmetro médio a altura do peito (1,3 m acima do nível do solo) da parcela. As árvores abatidas foram divididas em fuste (madeira, galhos e cascas) e folhas. Os compartimentos de cada árvore foram pesados em campo e amostras

representativas foram secas a 65°C até peso constante, para determinação da massa seca.

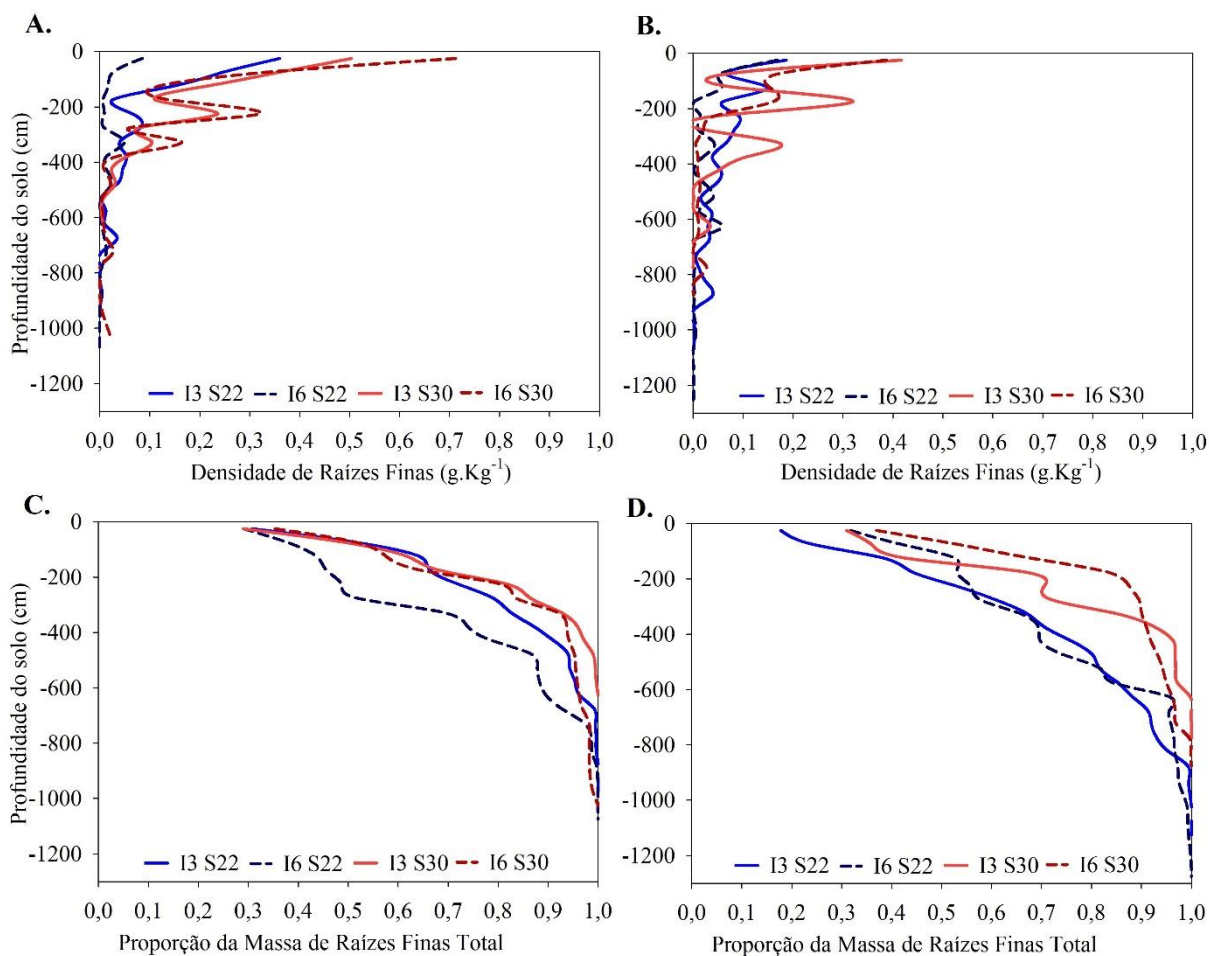
Para a amostragem aérea aos seis anos selecionou-se os indivíduos a partir de classes diamétricas determinadas em função da amplitude de DAP de cada parcela, sendo selecionadas 40 árvores da parcela destrutiva. Após aferição do DAP, calculou-se a diferença do maior e menor diâmetro das arvores dividido por sete, o valor obtido foi gradativamente somado as classes. Para cada uma das setes classes, selecionou-se um indivíduo em campo. Os componentes galhos e folhas tiveram a massa total aferida em campo e amostras representativas foram retiradas para determinação do peso seco. A peso do fuste foi determinado com base na densidade básica de discos retirados em seis posições distintas ao longo do crescimento, sendo na base, DAP, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com número de repetições variando de acordo com a variável amostrada. Para a análise dos dados, testou-se a interação entre o sitio de cultivo e a idade de amostragem para os componentes aéreos e radiculares através da análise de variância conjunta e individual utilizando o software R Studio. Para os efeitos significativos, realizou-se os desdobramentos e as médias de cada variável foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Análises de regressão foram utilizadas para testar as relações entre os pares univariados para os componentes acima e abaixo do solo. Os resultados foram plotados em gráficos construídos com o auxílio do software Sigma Plot.

3.3 RESULTADOS

As maiores densidades de raízes finas prevalecem nas camadas superficiais do solo (até -75cm) com valores entre 0,08 a 0,71 g.Kg⁻¹ (Fig. 2A e B) para ambas as amostragens, representando cerca de 50% da massa total (Fig. 2C e D). Diferentes estratégias de enraizamento foram adotadas pelos genótipos em função da idade e as condições climáticas do sítio. Em ambiente tropical (Bocaiuva – MG), a massa de raízes finas nas primeiras camadas do solo aumentou em cerca de 18% do meio para a final da rotação para os genótipos em estudo. Comportamento contrário foi observado para o sítio subtropical, pois os genótipos reduziram a biomassa de raízes finas nas camadas superficiais do solo (160%) em função da idade.

Figura 2 – Distribuição de raízes finas até a profundidade máxima encontrada para os genótipos A1 (A) e C3 (B) e proporção da massa de raízes finas acumulada até a profundidade máxima atingida encontrada para os genótipos A1 (C) e C3 (D) quando cultivados em Bocaiuva – MG (S30) e Telêmaco Borba (S22) aos 3 (I3) e 6 (I6) anos. Valores médios para as três posições independentes

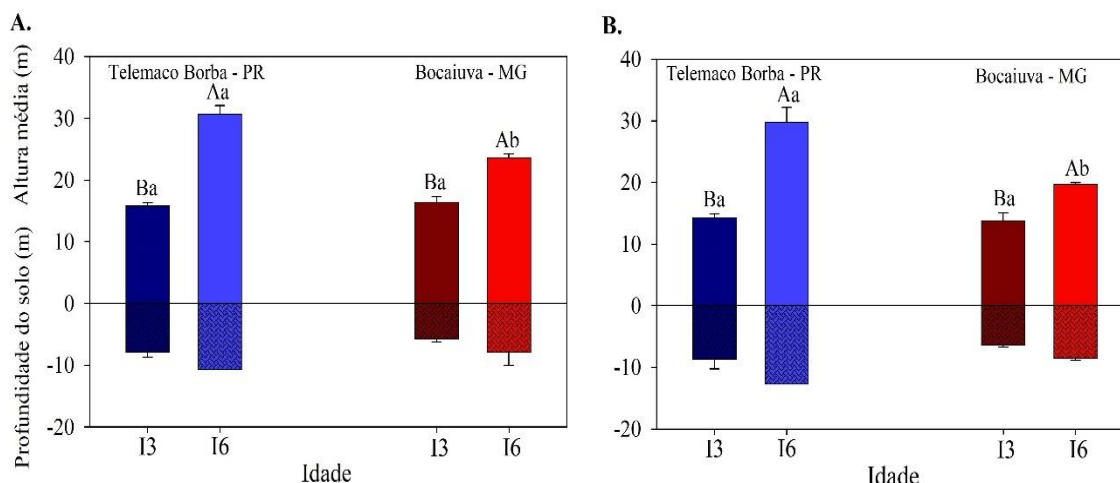


Maiores amplitudes nos valores de raízes finas são verificadas para ambos os genótipos quando cultivados no ambiente tropical, com valores variando de 0 a 0,8 g. Kg⁻¹ para o genótipo A1 e 0 a 0,4 g. Kg⁻¹ para o C3. Para o sítio subtropical, as amplitudes na massa de raízes foi apenas de 0 a 0,4 e 0 a 0,2 g. Kg⁻¹ para os clones A1 e C3, respectivamente (Fig. 2A e B).

Após os primeiros 75 cm do solo, a biomassa de raízes finas reduziu com o aumento da profundidade, chegando a patamares inferiores a 0,15 g.Kg⁻¹, com a exploração das raízes finas em camadas mais profundas logo no meio da rotação. O clone C3 apresentou profundidade máxima de enraizamento 28% superior ao

genótipo A1 independentemente do sítio de cultivo ou idade do plantio (Fig. 3A e B). Também foi verificada a presença de raízes finas em maiores profundidades aos seis anos, com valores situando-se entre 7,9 a 12,8 m, quando comparado os valores encontrados aos três anos (Fig.3).

Figura 3 – Média da altura das árvores e da profundidade máxima alcançada pelas raízes finas (em metros) para os genótipos A1 (A) e C3 (B) quando cultivados em Bocaiuva – MG (S30) e Telemaco Borba (S22) aos 3 (I3) e 6 (I6) anos. As barras verticais representam os desvios padrões para altura e profundidade máxima de raiz dos tratamentos. * Interação significativa para a variável altura. Letras maiúsculas comparam as idades do mesmo sítio e letras minúsculas os sítios para a mesma idade

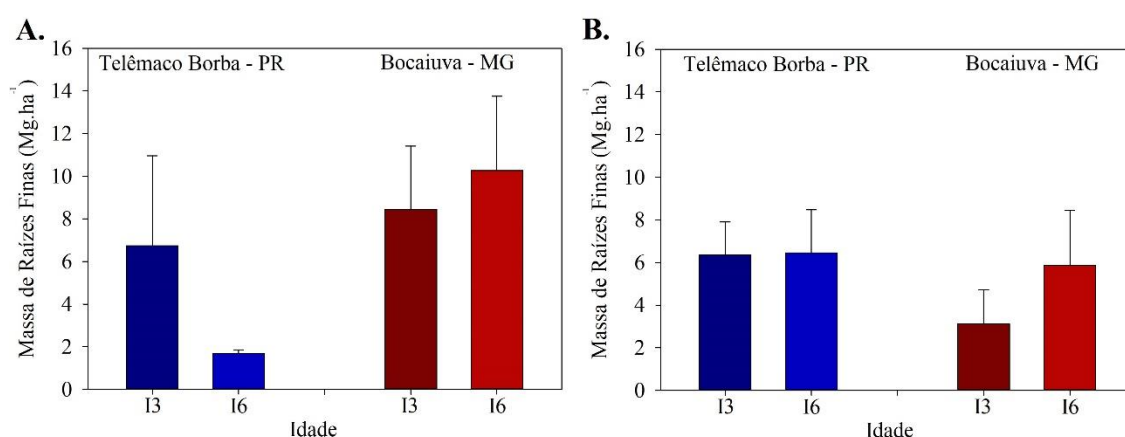


A altura da parte aérea deteve comportamento semelhante aos observados na profundidade máxima de enraizamento (Fig. 3A e B), com maiores valores no sítio subtropical. Os genótipos A1 e C3 apresentam maiores alturas da parte aérea aos seis anos quando comparado ao meio da rotação, sendo estes 50 e 30% superior ao ambiente tropical respectivamente. Embora nota-se o aumento da profundidade de raízes em função do aumento da altura da planta não foi possível identificar simetria entre essas duas variáveis. A profundidade máxima de enraizamento representa cerca de 40 a 50 % da altura da parte aérea para os genótipos A1 e C3 respectivamente.

A biomassa de raízes finas apresentou comportamento distinto para os genótipos em função da idade dos plantios. Em condições climáticas tropicais, maiores valores para esta variável foram observados aos seis anos, com aumento de 18% para o genótipo A1 e 47% para o C3 (Figura 4). Já em clima subtropical,

comportamentos distintos foram identificados, no qual o genótipo A1 reduziu a biomassa de raízes em até três vezes e o C3 manteve os valores do meio para o fim da rotação.

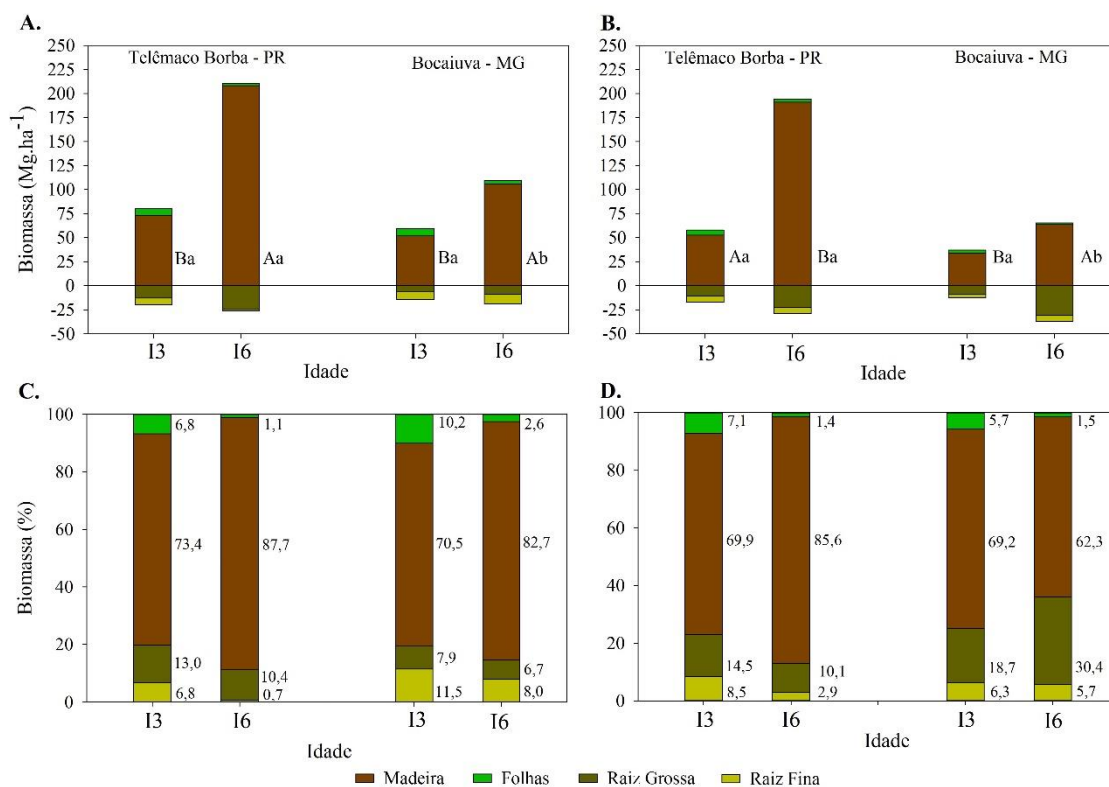
Figura 4 – Média da densidade de raízes finas para os genótipos A1 (A) e C3 (B) quando cultivados em Bocaiuva – MG (S30) e Telêmaco Borba (S22) aos 3 (I3) e 6 (I6) anos. Valores médios para as três posições independentes. As barras verticais representam os desvios padrões para a densidade de raízes finas dos tratamentos



Padrões peculiares para os genótipos também foram verificados ao comparar os valores de massa de raízes finas em função dos ambientes (Fig.3). O genótipo A1 apresenta maiores valores para esta variável quando cultivado em ambiente tropical, em média 55% independentemente da idade amostrada, quando comparado ao subtropical. Todavia, para o genótipo C3, verificou-se comportamento contrário, no qual a biomassa de raízes finas reduziu em 43% do ambiente subtropical para o tropical.

Com o aumento da idade das plantas, nota-se incremento da biomassa total para os sítios e genótipos avaliados, verificando-se incremento de 140 Mg.ha⁻¹ para o sítio subtropical, e 50 Mg.ha⁻¹ para ambiente tropical (Fig. 5). Avaliando os componentes separadamente, nota-se que o genótipo A1 reduziu a porcentagem de biomassa alocada para os componentes folhas, raiz grossa e raiz fina, aumentando a biomassa alocada no fuste. Comportamento similar foi observado para o C3 no sítio subtropical, porém no ambiente seco, este genótipo aumentou a biomassa de raízes grossas do meio para o fim da rotação, reduzindo para os demais componentes do meio para o fim da rotação.

Figura 5 – Biomassa para os componentes madeira (fuste, galho e casca), folhas, raízes grossas (<2mm) e raízes finas (<1mm) para os genótipos A1 (A e C) e C3 (B e D) quando cultivados em Bocaiuva – MG (S30) e Telêmaco Borba (S22) aos 3 (I3) e 6 (I6) anos. Letras maiúsculas comparam as idades e minúsculas os sítios



3.4 DISCUSSÃO

A influência das condições climáticas na distribuição de raízes finas confirma a plasticidade fenotípica do sistema radicular de espécies de *Eucalyptus* durante o seu crescimento. Elevada densidade de raízes finas foram verificadas nos primeiros centímetros do solo em ambos os sítios de cultivo e idades amostradas (Fig. 2), o que, provavelmente está associado a disponibilidade de recursos. Maiores concentrações de elementos minerais são encontradas nas camadas iniciais do perfil do solo, seja oriundo de fertilização ou da ciclagem de nutrientes (LACLAU et al., 2003; ZHOU; SHANGGUAN, 2007), logo, com o aumento da profundidade do solo, a densidade de raízes finas tende a reduzir (Fig. 2). Embora o comportamento de distribuição de raízes finas seja semelhante às encontradas em outras florestas de *Eucalyptus spp*

(GERMON et al., 2019), são escassas as informações que remetem o comportamento do clone em diversos locais.

Raízes finas profundas são comumente relatadas como aquelas que crescem além de um metro de profundidade (MAEGHT; REWALD; PIERRET, 2013) e desempenham papel importante na absorção de quantidades expressivas de água necessárias ao crescimento da planta (PIERRET et al., 2016). Neste estudo, os genótipos A1 e C3 apresentaram raízes finas crescendo abaixo de cinco metros já no terceiro ano de cultivo (Fig. 3), o que pode ser retratado com uma característica de resistência a seca (CHRISTINA et al., 2017). Nestes casos as plantas tendem a procurar água em camadas mais profundas, quando a disponibilidade hídrica superficial é escassa (PIERRET et al., 2016).

Outro aspecto que merece destaque é a profundidade de enraizamento em função da disponibilidade hídrica, estudos indicam maiores crescimentos verticais de raízes finas em solos secos, como alternativa para acessar água nas camadas profundas do solo (BENGOUGH et al., 2011). Tal comportamento não ocorreu neste estudo, pois a maior ocorrência de raízes finas em camadas mais profundas de solo foi constatada no ambiente úmido, independentemente da idade ou material genético utilizado (Fig. 3). A tendência inversa observada neste estudo pode estar associada a outros fatores, como por exemplo, a alta produtividade dos genótipos no sítio subtropical (Fig. 5). O processo fotossintético está diretamente relacionado a perda de água pela transpiração, as quais são consideravelmente maiores em florestas com elevadas produtividades (STAPE; BINKLEY; RYAN, 2004).

Vale ressaltar que a disponibilidade de água não é o único fator abiótico que influencia a profundidade de enraizamento, a textura do solo, o tamanho do horizonte orgânico (SCHENK; JACKSON, 2002) e as características intrínsecas a espécie também ditaram a profundidade de enraizamento alcançada (HODGE et al., 2009). Outro aspecto a ser abordado é que os estudos existentes com raízes finas são geralmente realizados em um único ambiente com boa disponibilidade de recursos, comparando materiais genéticos de elevada produtividade (CHRISTINA et al., 2011; GERMON et al., 2019; PINHEIRO et al., 2016). De maneira oposta neste estudo, avaliou-se ambientes distintos, com quantidade de recursos (água, luz, nutrientes, dentre outros) totalmente contrastantes, o que impacta diretamente o crescimento das plantas.

A expressão das características funcionais da planta pode ser ajustada ao ambiente, permitindo que as plantas sobrevivam e cresçam sob várias condições climáticas (VALLADARES; GIANOLI; GÓMEZ, 2007). Esta plasticidade intraespecífica à disponibilidade de recursos foi amplamente observada nos valores de biomassa de raízes finas para os genótipos A1 e C3. Em solos com presença elevada de déficit hídrico, como verificado no sítio tropical em estudo, a massa de raízes finas aumentou para os dois genótipos em estudo dos três para os seis anos (Fig. 4A e B). O que pode ser explicado a partir da hipótese de equilíbrio funcional, na qual a massa de raiz fina aumenta em relação a biomassa total da planta quando os recursos do solo são limitados (WEEMSTRA et al., 2017). Indicando que as árvores investem proporções maiores de biomassa em órgãos subterrâneos, em especial na produção de raízes finas, no intuito de explorar maior volume de solo e atingir reservatórios de água disponíveis para atender a demanda necessária para o crescimento da planta (CAMPOE et al., 2020).

Os genótipos divergiram nos valores de biomassa para as duas idades amostradas em ambiente subtropical, onde o A1 apresentou redução nos valores desta variável e o C3 aumento (Fig. 4). Os sistemas radiculares são modulares, o que permite que sejam extremamente plásticos seja, com as características da espécie que deu origem ao material genético, ou com as características do ambiente (ZOBEL; WYK; STAHL, 1987). O que é verificado para o C3, que apresenta alta tolerância a seca, provavelmente adquirido da espécie *E. camaldulensis*, alocando alto fluxo de carbono subterrâneo para órgãos subterrâneos (CAMPOE et al., 2020). Mesmo em ambientes com elevada disponibilidade hídrica, este genótipo prioriza a alocação de biomassa para o sistema radicular, o que pode ser uma vantagem para lidar com os eventos de seca severa (CHRISTINA et al., 2017).

A disponibilidade de água é um dos maiores inibidores do crescimento dos plantios de *Eucalyptus spp*, pois afeta significativamente a eficiência do uso de recursos, assim como a alocação de biomassa (STAPE et al., 2004). Em termos de proporção, a biomassa de raízes finas é menor, quando comparada aos demais componentes (Fig. 5), no entanto, as raízes finas são muito dinâmicas e desempenham um papel fundamental no ciclo e acúmulo de carbono e nutrientes do ecossistema florestal (HELMISAARI et al., 2002). Como a alocação de biomassa se difere entre os genótipos em cada ambiente de plantio, pode haver oportunidade para

selecionar genótipos que maximizem a produtividade do fuste, sobretudo em ambientes com maior disponibilidade de recurso, conforme verificado para o A1.

3.5 CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que, as raízes finas são estimuladas de forma distinta, quando submetidas a climas contrastantes, além de serem impactadas com o aumento da idade da planta. Maior densidade de raízes finas foram verificadas nos primeiros centímetros do solo em ambos os sítios de cultivo e idades amostradas. Os genótipos A1 e C3 apresentaram comportamento semelhante quanto ao acúmulo de massa de raízes finas em Bocaiúva – MG, notando-se incremento desta variável com o aumento da idade da planta. Já em Telêmaco Borba – PR, o genótipo A1 apresentou decréscimo no acúmulo de massa radicular do meio para o fim da rotação, enquanto no genótipo C3, não houve alterações.

As variações nos valores de biomassa encontradas para os genótipos A1 e C3 refletem características adaptativas que podem ser exploradas pelas empresas florestais durante a seleção de espécies a serem cultivadas.

REFERÊNCIAS

- ADDO-DANSO, S. D.; PRESCOTT, C. E.; SMITH, A. R. Methods for estimating root biomass and production in forest and woodland ecosystem carbon studies: A review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 359, p. 332–351, 2016.
- BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, n. 1, p. 59–68, 2011.
- 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, n. September, p. 271–283, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>>
- BOOTH, T. H. Eucalypt plantations and climate change. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 28–34, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.004>>
- CALDEIRA, D. R. M.; ALVARES, C. A.; CAMPOE, O. C.; HAKAMADA, R. E.; GUERRINI, I. A.; CEGATTA, Í. R.; STAPE, J. L. Multisite evaluation of the 3-PG model for the highest phenotypic plasticity Eucalyptus clone in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 462, n. November 2019, p. 117989, 2020.
- CAMPOE, O. C.; ALVARES, C. A.; CARNEIRO, R. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; HUBBARD, R. M.; STAHL, J.; MOREIRA, G.; MORAES, L. F.; STAPE, J. L. Climate and genotype influences on carbon fluxes and partitioning in Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 475, n. May, 2020.
- 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**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 1–10, 2011.
- 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**, Oxford, v. 31, n. 2, p. 509–519, 2017.
- ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; DE FREITAS, C. H.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C. A. Intercomparison of structural features and performance of Eucalyptus simulation models and their ensemble for yield estimations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 450, n. July, p. 117493, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117493>>
- EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Rio de Janeiro, Brasil: EMBRAPA, 1997.

- GERMON, A.; JOURDAN, C.; BORDRON, B.; ROBIN, A.; NOUVELLON, Y.; CHAPUIS-LARDY, L.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; PRADIER, C.; GUERRINI, I. A.; LACLAU, J. P. Consequences of clear-cutting and drought on fine root dynamics down to 17 m in coppice-managed eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 445, n. February, p. 48–59, 2019.
- HELMISAARI, H. S.; MAKKONEN, K.; KELLOMÄKI, S.; VALTONEN, E.; MÄLKÖNEN, E. Below- and above-ground biomass, production and nitrogen use in Scots pine stands in eastern Finland. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 165, n. 1–3, p. 317–326, 2002.
- HENDRICK, R. L.; PREGITZER, K. S. The relationship between fine root demography and the soil environment in northern hardwood forests. **Ecoscience**, Sainte-Foy, v. 4, n. 1, p. 99–105, 1997.
- HODGE, A.; BERTA, G.; DOUSSAN, C.; MERCHAN, F.; CRESPI, M. **Plant root growth, architecture and function**. [s.l: s.n.]. v. 321
- HUBBARD, R. M.; CARNEIRO, R. L.; CAMPOE, O.; ALVARES, C. A.; FIGURA, M. A.; MOREIRA, G. G. Contrasting water use of two Eucalyptus clones across a precipitation and temperature gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 475, n. June, p. 118407, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118407>>
- KLEIDON, A.; HEIMANN, M. Assessing the role of deep rooted vegetation in the climate system with model simulations: Mechanism, comparison to observations and implications for Amazonian deforestation. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 16, n. 2–3, p. 183–199, 2000.
- 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**, London, v. 91, n. 7, p. 879–892, 2003.
- LEUSCHNER, C.; HERTEL, D.; SCHMID, I.; KOCH, O.; MUHS, A.; LEUSCHNER, C.; HERTEL, D.; SCHMID, I.; KOCH, O.; MUHS, A. Stand fine root biomass and fine root morphology in old-growth beech forests as a function of precipitation and soil fertility. **Plant and Soil**, The Hague, v. 258, p. 43–56, 2004.
- MAEGHT, J. L.; REWALD, B.; PIERRET, A. How to study deep roots-and why it matters. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 4, n. AUG, p. 1–14, 2013.
- NADELHOFFER, K. J. The potential effects of nitrogen deposition on fine-root production in forest ecosystems. **New Phytologist**, Cambridge, v. 147, n. 1, p. 131–139, 2000.
- NAVROSKI, M. C.; BIALI, L. J.; BIANCHIN, J.; CAMARGO, L.; SCHUMACHER, M. V. Quantificação de biomassa e comprimento de raízes finas em povoamento de Eucalyptus cloeziana F. Muell. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 535–540, 2010.

PIERRET, A.; MAEGHT, J. L.; CLÉMENT, C.; MONTOROI, J. P.; HARTMANN, C.; GONKHAMDEE, S. Understanding deep roots and their functions in ecosystems: An advocacy for more unconventional research. **Annals of Botany**, London, v. 118, n. 4, p. 621–635, 2016.

PINHEIRO, R. C.; DE DEUS, J. C.; NOUVELLON, Y.; CAMPOE, O. C.; STAPE, J. L.; ALÓ, L. L.; GUERRINI, I. A.; JOURDAN, C.; LACLAU, J. P. A fast exploration of very deep soil layers by Eucalyptus seedlings and clones in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 366, p. 143–152, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.02.012>>

PREGITZER, Kurt S.; KING, J. S.; BURTON, A. J.; BROWN, S. E. Responses of tree fine roots to temperature. **New Phytologist**, Cambridge, v. 147, p. 105–115, 2000.

SAINJU, U. M.; GOOD, R. E. Vertical root distribution in relation to soil properties in New Jersey Pinelands forests. **Plant and Soil**, The Hague, v. 150, n. 1, p. 87–97, 1993.

SCHENK, H. J.; JACKSON, R. B. The global biogeography of roots. **Ecological Monographs**, Lawrence, v. 72, n. 3, p. 311–328, 2002.

STAFF, S. S. **Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys**. 436. ed. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Agriculture Handbook, 1999.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, n. 1–2, p. 17–31, 2004.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; DO NASCIMENTO GOMES, A. Water use, water limitation, and water use efficiency in a Eucalyptus plantation. **Bosque**, Valdivia, v. 25, n. 2, p. 35–41, 2004.

VALLADARES, F.; GIANOLI, E.; GÓMEZ, J. M. Ecological limits to plant phenotypic plasticity. **New Phytologist**, Cambridge, v. 176, n. 4, p. 749–763, 2007.

VOGT, K. A.; VOGT, D. J.; BLOOMFIELD, J. Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forests at an ecosystem level. **Plant Soil**, The Hague, v. 200, p. 71–89, 1998.

WEEMSTRA, M.; STERCK, F. J.; VISSER, E. J. W.; KUYPER, T. W.; GOUDZWAARD, L.; MOMMER, L. Fine-root trait plasticity of beech (*Fagus sylvatica*) and spruce (*Picea abies*) forests on two contrasting soils. **Plant and Soil**, The Hague, v. 415, n. 1–2, p. 175–188, 2017.

ZHOU, Z.; SHANGGUAN, Z. Vertical distribution of fine roots in relation to soil factors in *Pinus tabulaeformis* Carr. forest of the Loess Plateau of China. **Plant and Soil**,

The Hague, v. 291, n. 1–2, p. 119–129, 2007.

ZOBEL, B. J.; WYK, G. V.; STAHL, P. **Growing exotic forests**. Michigan, 1987.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo contribui para o melhor entendimento das características adaptativas de genótipos de eucalipto as alterações climáticas globais, assim como a expansão dos plantios para regiões ainda desconhecida pela silvicultura, evidenciando as principais estratégias para maximizar a absorção de recursos, garantindo maiores produtividades.

As distintas adequações do sistema radicular das plantas de eucalipto a disponibilidade de água e textura do solo poderão auxiliar as empresas florestais na seleção de genótipos mais adaptados as inúmeras áreas de cultivo. O que sugere que o enraizamento em camadas profundas do solo dever ser considerado em modelos que visam predizer a produtividade de plantios de eucalipto.

A originalidade deste estudo consiste na realização de coletas de raízes finas em profundidade para genótipos de eucaliptos cultivados em ambientes com diferenças significativas nas condições edafoclimáticas.

REFERÊNCIAS

- ADDO-DANSO, S. D.; PRESCOTT, C. E.; SMITH, A. R. Methods for estimating root biomass and production in forest and woodland ecosystem carbon studies: A review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.359, p.332-351. 2016.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O.C.; ALVAREZ, C.; CARNEIRO, R.L.; CAGATTA, I.; 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.
- GONÇALVES, J.L.; ALVARES, C.A.; HIGA, A.R.; SILVA, L.D.; ALFENAS, A.C.; ATAH, J. FERRAZ, S.F.B.; LIMA, W.P.; BRANCALION, P.H.S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J-P.; LACLAU, J-P, NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic na biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**. Amsterdam, v.301, p6-27, 2013.
- HENDRICK, R.L.; PREGITZER, K.S. Temporal and depth related patterns of the fine root dynamics in northern hardwood forests. **Journal of Ecology**, Oxford, v.84, p.167-176, 1996.
- 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, n.6, p.1863-1869, 1997.
- KLEIDON, A.; HEIMANN, M. Assessing the role of deep rooted vegetation in the climate system with model simulations: mechanism, comparison to observations and implications for Amazonian deforestation. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 16, p. 183-199, 2000.
- LACLAU, J.-P. et al. 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**, [s. l.], v. 4, n. 243, jul. 2013.
- LAMBAIS, G. R. **Produção e mortalidade de raízes finas em plantações de Eucalyptus grandis cultivados em Latossolos (Itatinga-SP)**. Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP, Tese (Doutor em Ciências), 2015.
- LEITE, F. P., BARROS, N. F., NOVAIS, R. F., SANS, L. M. A., FABRES, A. S. relações hídricas em povoamento de eucalipto com diferentes densidades populacionais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 9-16,1999.
- NAVROSKI, M. C.; BIALI, L. J.; BIANCHIN, J. E.; CAMARGO, L.; SCHUMACHER, M. V. Quantificação de biomassa e comprimento de raízes finas em povoamento de Eucalyptus cloeziana F. Muell. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 5, n. 4, p. 535-540, 2010.

RADVILLÉ, L.; McCORMACK, M.L.; POST, E.; EISSENSTAT, D. Root phenology in a changing climate. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.67, p.3617-3628, 2016.

SILVER, W. L.; NEFF, J.; VELDKAMP, E. The effects of soil texture on belowground carbon and nutrient storage in a lowland Amazonian forest ecosystem. **Ecosystems**, New York, v. 3, p. 193-209, 2000.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; NASCIMENTO G. A. Water use, water limitation and water use efficiency in a Eucalyptus plantation. **Bosque**, Valdivia, v.25, n.1, p.35-41, 2004.

VOGT, K. A.; VOGT, D. J. Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forests at an ecosystem level. **Plant and Soil**, The Hague, 200, 71 – 89, 1998.