

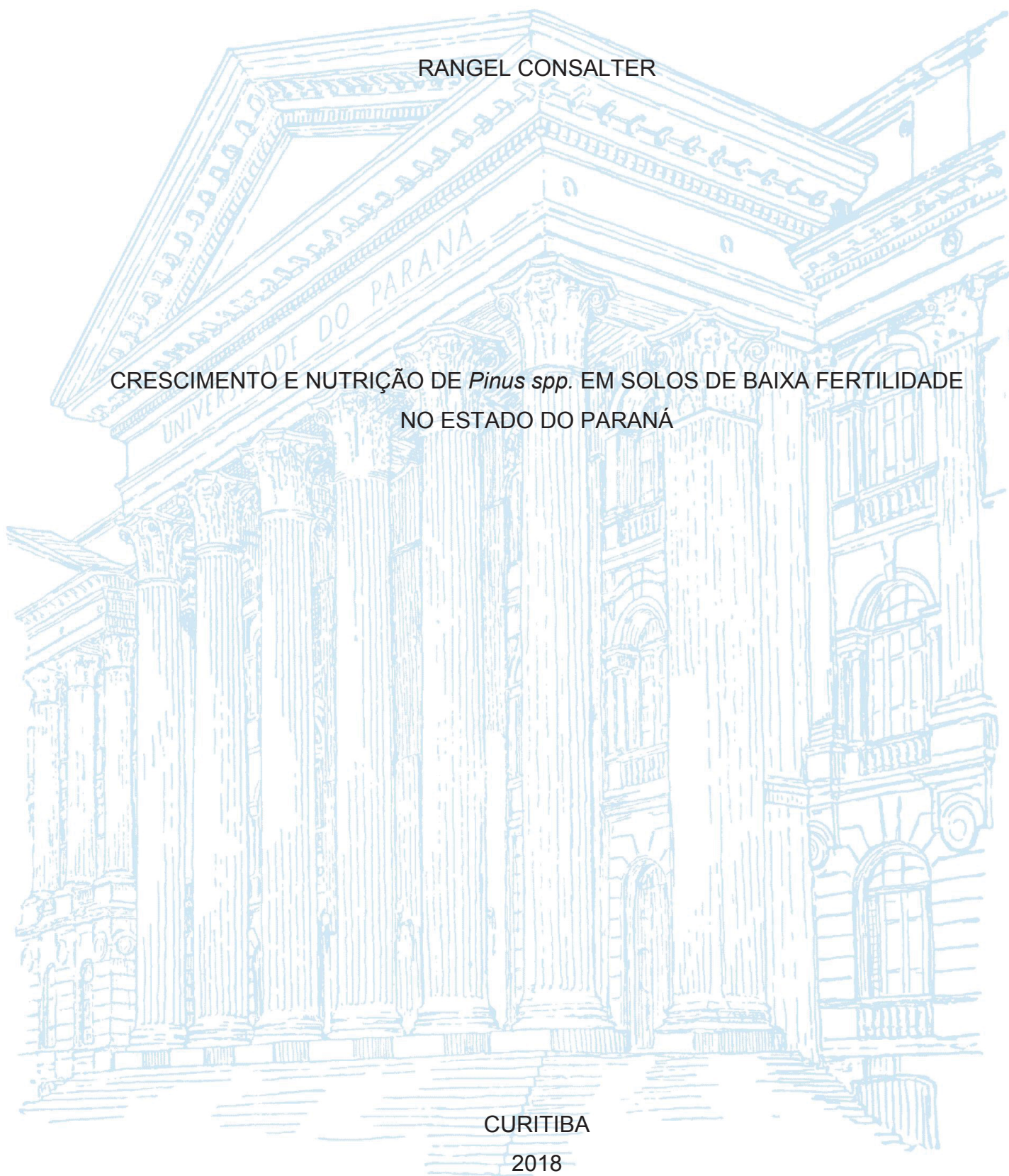
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RANGEL CONSALTER

CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DE *Pinus spp.* EM SOLOS DE BAIXA FERTILIDADE  
NO ESTADO DO PARANÁ

CURITIBA

2018



RANGEL CONSALTER

CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DE *Pinus spp.* EM SOLOS DE BAIXA FERTILIDADE  
NO ESTADO DO PARANÁ

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em  
Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias,  
Universidade Federal do Paraná, como requisito  
parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência  
do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Vargas Motta

Coorientadora: Profa. Dra. Silvana Nisgoski

CURITIBA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR -  
BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, DOUGLAS ALEX JANKOSKI CRB 9/1167  
COM OS DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

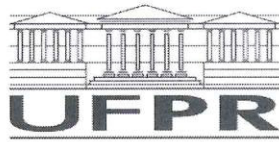
C755c Consalter, Rangel  
Crescimento e nutrição de *Pinus spp.* em solos de baixa  
fertilidade no estado do Paraná / Rangel Consalter. -  
Curitiba, 2018.  
124 f.: il., grafs., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná.  
Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação  
em Ciências do Solo.

Orientador: Antônio Carlos Vargas Motta  
Coorientadora: Silvana Nisgoski

1. *Pinus taeda* - Solos. 2. Serapilheira. 3. Ciclo mineral  
(Biogeoquímica). I. Motta, Antônio Carlos Vargas. II.  
Nisgoski, Silvana. III. Título. IV. Universidade Federal do  
Paraná.

CDU 633.94(816.2)



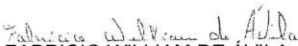
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRARIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS DO SOLO

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **RANGEL CONSALTER** intitulada: **Crescimento e nutrição de pinus ssp em solos de baixa fertilidade no estado do Paraná**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.


Curitiba, 26 de Fevereiro de 2018.

  
ANTONIO CARLOS VARGAS MOTTA  
Presidente da Banca Examinadora

  
FABRÍCIO WILLIAM DE ÁVILA  
Avaliador Externo

  
ARAINA HULMANN BATISTA  
Avaliador Externo

  
SHIZUO MAEDA  
Avaliador Externo

  
CARLOS BRUNO REISSMANN  
Avaliador Externo

Dedico essa tese de doutorado ao meu pai, Estevão Consalter, que nunca poupou tempo, energia e recursos quando a assunto era nos conceder oportunidades.

Sacrificando a si mesmo dia após dia, apenas na esperança de ver seus filhos evoluírem.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, por sempre colocar a mim e meu irmão como prioridade na sua vida. Todo seu apoio incondicional ao longo de minha caminhada fez toda diferença. À minha mãe, por sempre ter se preocupado em nos preparar para a vida, se recusando terminantemente a nos mimar por mais avassaladora que a situação parecesse. E ao meu irmão, pelo ombro a ombro nas batalhas da vida. À minha tia Lucía, por tudo.

Também ao meu orientador, pela paciência e dedicação durante meu ingresso no mundo acadêmico, e por se preocupar em formar seres humanos. Ao meu amigo Julierme, por sempre acreditar. E ao Gabriel, pelo companheirismo inabalável. Ao Mano, por se permitir fazer parte da minha vida. À amiga Júlia, por estar sempre pronta para o que desse e viesse.

Às técnicas de laboratório Fabiane e Carla, pelos sorrisos nos rostos. Aos professores Volnei Pauletti, Fabiane Vezzani, Vander de Freitas Melo e Jeferson Dieckow, por sempre deixarem as portas das suas salas abertas. Também a Denise, o chaveirinho da pós, pelo eterno atendimento impecável. Aos amigos e estagiários Paulo, Tiago, David e Guilherme, sem vocês esse trabalho não seria possível.

Aos meus amigos do Magnólia, Estevão, Taisy, Jéssica, Thailiny e Juliana, vocês fazem meus dias melhores. A minha mais nova amiga, Bruna vermeinha, por me fazer acreditar que os bons podem ser maioria. E também a uma velha amiga, Lilly, que faz minha vida ser um *big deal*.

Ao CNPQ, pela concessão do suporte financeiro. Um agradecimento especial ao contribuinte, visto que uma quantidade dos impostos pagos por vocês é destinado ao ensino e a pesquisa.



## RESUMO

Com o objetivo geral de ampliar o conhecimento das carências nutricionais que desencadeiam problemas nutricionais e limitam a produtividade de plantios de *Pinus*, na região de Jaguariaíva/PR, e também estudar as adaptações dessas plantas para aquisição de nutrientes, foram conduzidos quatro estudos: 1) Experimento de diagnose nutricional por omissão de nutrientes em 06 plantios de *P. taeda* L. estabelecidos (Com idades entre 5 e 17 anos) ao longo do polo florestal de Jaguariaíva (Tratamentos: Completo, -NPK, -Micro (B, Cu, Mo e Zn), -K, -Zn, - Calcário e Testemunha), os plantios foram avaliados quanto a produtividade por 07 anos; 2) Em uma das seis áreas do estudo nº 1 foi realizado um estudo mais específico sobre os efeitos dos tratamentos de fertilização na produção de madeira e o sortimento das toras, na quantidade de serapilheira acumulada e colonização desta pelas raízes das plantas de *P. taeda* L.; 3) Na mesma área e ocasião também se estudou a entrada e o efeito residual dos nutrientes aplicados, no ciclo biogeoquímico de nutrientes do ecossistema floresta, isso através de uma coleta pontual de acículas e serapilheira com raízes, e posterior quantificação da concentração de nutrientes, sete anos após a aplicação dos tratamentos; 4) Foi realizado um estudo de caso com *P. herrerae* M., o estudo relata um atalho no ciclo geoquímico de nutrientes, plantas de *P. herrerae* M. colonizam troncos mortos mas ainda eretos de árvores adjacentes, se beneficiando da liberação de nutrientes ali contidos. Em linhas gerais observou se que os plantios de *P. taeda* L. apresentam carência generalizada de P e apresentam uma capacidade fabulosa para aquisição e manutenção de K. De uma forma geral, a aplicação de micronutrientes e calcário sobre a serapilheira de plantios estabelecidos causaram efeitos deletérios na produtividade, todavia, carência de Ca, Mg e Zn foram identificadas pelos efeitos dos tratamentos nas concentrações desses nutrientes nas acículas. O sanamento de carências mais limitantes do que a de K em plantios estabelecidos de *P. taeda* L. possivelmente permita as plantas compensarem a falta do nutriente com adaptações no ciclo das acículas e exploração radicular da serapilheira. O presente estudo forneceu indicativos favoráveis para a ideia de que plantas de *Pinus* seriam adaptadas a altos níveis de Mn nas acículas graças a um fenômeno cíclico de auto toxidez de Mn, causado por características químicas do elemento associadas com a forma de aquisição de nutrientes das plantas. A aplicação superficial de calcário em plantios estabelecidos de *P. taeda* L. tem potencial para afetar o ciclo geoquímico dos nutrientes Mn e S, mesmo sem que esses sejam aplicados de fato. Raízes de plantas de *P. herrerae* M. podem alcançar alturas em magnitude métrica acima do solo enquanto colonizam troncos eretos de plantas adjacentes mortas, esse ambiente é mais atrativo do que a serapilheira e solo, especialmente pela disponibilidade de P e possivelmente menor acidez.

Palavras-chave: Fertilização, NPK, *Pinus taeda* L., serapilheira, ciclagem de nutrientes, raízes

## ABSTRACT

With the general objective of increasing the knowledge of the nutritional deficiencies that trigger nutritional problems and limit the productivity of *Pinus* plantations in the region of Jaguariaíva/PR, and also study the adaptations of these plants for nutrient acquisition, four studies were conducted: 1) Nutritional diagnosis by omission of nutrients in six established plantations of *P. taeda* L. (Aged between 5 and 17 years) along the Jaguariaíva forest pole (Treatments: Complete, -NPK, -Micro (B, Cu, Mo and Zn), -K, -Zn, -Lime and Control), the plantations were evaluated for productivity belong 07 years; 2) In one of the six areas of study nº 1, a more specific study was carried out, about the effects of fertilization treatments on wood production and the assortment of logs, on the amount of accumulated litter and its colonization by the roots of *P. taeda* L.; 3) In the same area and occasion, the input and residual effect of the applied nutrients were studied in the biogeochemical cycle of nutrients of the forest ecosystem, through a punctual sampling of needles and litter with roots, and subsequent quantification of the concentration of nutrients, seven years after the application of the treatments; 4) A study of case was carried out with *P. herrerae* M. plantation, the study reports a shortcut in the geochemical cycle of nutrients, *P. herrerae* M. roots colonize still erect dead trunks of adjacent trees, benefiting from the release of nutrients there contained. In general lines, it was observed that the plantations of *P. taeda* L. present generalized deficiency of P and present a fabulous capacity for acquisition and maintenance of K. In general, the application of micronutrients and limestone on the litter of established plantations caused deleterious effects. However, lack of Ca, Mg and Zn were identified by the effects of treatments on the concentrations of these nutrients in the needles. The healing of deficiencies more limiting than that of K in established plantations of *P. taeda* L. possibly allows the plants to compensate for the lack of that nutrient (K) with adaptations in the cycle of the needles and radicular exploration of the litter. The present study provided favorable indications for the idea that *Pinus* plants would be adapted to high levels of Mn in the needles due to a cyclic phenomena of Mn self toxicity caused by chemical element characteristics associated with the nutrient acquisition form of plants. The superficial application of limestone in established plantations of *P. taeda* L. has the potential to affect the geochemical cycle of the nutrients Mn and S, even though these are not actually applied. *P. herrerae* M. plant roots can reach heights of metric magnitude above the soil while colonizing standing trunks of dead adjacent plants, this environment is more attractive than litter and soil, especially due to the availability of P and possibly lower acidity.

Key-Words: Fertilization, NPK, *Pinus taeda* L., Litter layer, nutrientes cycling, roots



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO I. PRODUÇÃO DE MADEIRA EM RESPOSTA A FERTILIZAÇÃO E CALAGEM DE <i>P. TAEDA L.</i> EM SOLOS DE CERRADO DO BRASIL SUBTROPICAL.....</b>	<b>12</b>
2.1	RESUMO .....	12
2.2	ABSTRACT .....	13
2.3	INTRODUÇÃO .....	14
2.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	15
2.4.1	ÁREA DE ESTUDO .....	15
2.4.2	DESENHO EXPERIMENTAL.....	18
2.4.3	AVALIAÇÕES .....	19
2.4.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	20
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	21
2.5.1	RESULTADOS.....	21
2.5.2	DISCUSSÃO .....	30
2.6	CONCLUSÕES.....	33
2.7	REFERÊNCIAS.....	34
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO II: FERTILIZAÇÃO DE <i>P. TAEDA L.</i> EM ARAPOTI/PR: PRODUTIVIDADE DE MADEIRA, DE SERAPILHEIRA E RAÍZES NA SERAPILHEIRA .....</b>	<b>37</b>
3.1	RESUMO .....	37
3.2	ABSTRACT .....	38
3.3	INTRODUÇÃO .....	39
3.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	42
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	46
3.6	CONCLUSÕES.....	59
3.7	REFERÊNCIAS.....	60
<b>4</b>	<b>CAPÍTULO III. CALAGEM E FERTILIZAÇÃO EM PLANTIO ESTABELECIDO DE <i>P. TAEDA L.</i> EM ARAPOTI/PR: INGRESSO DE NUTRIENTES NO CICLO BIOGEOQUÍMICO .....</b>	<b>66</b>
4.1	RESUMO .....	66
4.2	ABSTRACT .....	67

4.3	INTRODUÇÃO .....	68
4.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	70
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	74
4.6	CONCLUSÕES.....	98
4.7	REFERÊNCIAS.....	99
<b>5</b>	<b>CAPÍTULO IV. RAÍZES DE PINUS COLONIZANDO TRONCOS MORTOS AINDA ERETOS: UM ATALHO NO PROCESSO BIOGEOQUÍMICO .....</b>	<b>106</b>
5.1	RESUMO .....	106
5.2	ABSTRACT .....	107
5.3	INTRODUÇÃO .....	108
5.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	109
5.4.1	ÁREA DE ESTUDO .....	109
5.4.2	COLETA DE AMOSTRAS DE PLANTA, SERRAPILHEIRA E SOLO .....	110
5.4.3	IDENTIFICAÇÃO DA FONTE E DO TIPO DE RAÍZES QUE COLONIZAM AS ÁRVORES MORTAS .....	110
5.4.4	ANÁLISES DAS AMOSTRAS .....	111
5.4.5	ANÁLISE DOS DADOS.....	112
5.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	112
5.5.1	ESTADO NUTRICIONAL DO <i>Pinus herrerae</i> M. ....	112
5.5.2	FENÔMENO DE COLONIZAÇÃO DE ÁRVORES MORTAS EM <i>Pinus herrerae</i> .....	113
5.5.3	CARACTERÍSTICAS DAS RAÍZES .....	115
5.5.4	EFEITO DA COLONIZAÇÃO POR RAÍZES NO TEOR DE NUTRIENTES NO LENHO E NA CASCA DAS ÁRVORES MORTAS .....	119
5.6	CONCLUSÕES.....	121
5.7	REFERÊNCIAS.....	122
<b>6</b>	<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>125</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>126</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No sentido mais amplo, o solo é um centro de conversão de nutrientes em demandas sociais (alimento, fibra, energia e combustíveis). Essa conversão é realizada pela capacidade fotossintética das plantas. Caso apenas um dos 14 nutrientes requeridos para a sobrevivência das plantas (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cl, Zn, Cu, Fe, Mn, Mo e Ni) se tornasse deficiente por algum motivo, a capacidade produtiva dos solos (fotossíntese das plantas) se tornaria limitada pela disponibilidade desse nutriente. Não obstante a esse valor, o solo *per se* é dotado de grande importância. Abriga basicamente toda água pluvial, na forma de rios, lagos e águas subterrâneas. É também dreno para contaminantes e tampão natural de elementos químicos e substâncias, para a atmosfera, hidrosfera e biota.

O cultivo de florestas pode ser benéfico para o solo, aumentando a capacidade de armazenamento de água e protegendo-o contra a erosão, além do fornecimento de produtos florestais como madeira, celulose, fibras, resina (no caso do pinus), etc.

A região de Jaguariaíva/PR está situada sobre solos oriundos de material de origem pobre, além do alto grau de intemperização que intensifica a pobreza nutricional intrínseca do material de origem também é notável o baixo poder tampão nutricional desses solos oriundos de arenitos. O resultado são solos muito pobres em nutrientes, com elevada acidez e baixo poder tampão.

Mesmo num ambiente tão crítico e quimicamente sensível, a implantação da essência florestal *Pinus sp.* teve êxito. Hoje em dia a região abriga um dos maiores polos florestais do estado (ABRAF, 2013). Inicialmente, as plantas se desenvolveram de forma exuberante e apresentaram produtividade comercialmente satisfatória, mesmo sem o fornecimento inicial de nutrientes requeridos para o crescimento das plantas (fertilização). A colheita dos troncos se tratava então da retirada de nutrientes do solo sem reposição.

Cultivos sucessivos realizados dessa forma esgotam reservas nutricionais do solo, e o resultado prático em plantios de pinus é a ocorrência de problemas nutricionais como amarelecimento das acículas até morte precoce de plantas. Esses sintomas são um reflexo do empobrecimento químico e consequente degradação do solo.

Uma resposta para essa problemática seria a fertilização dos plantios de pinus mesmo que já estabelecidos. Estudos prévios indicam que plantios de pinus se desenvolvem adequadamente mesmo quando o solo apresenta níveis baixos de nutrientes. Dessa maneira, a manutenção de níveis de nutrientes no sistema floresta em níveis próximos dos mínimos para que se obtenha uma produtividade satisfatória (através de fertilizações) seria uma forma de se manter níveis de nutrientes e acidez do solo na magnitude dos níveis naturais, com os benefícios do cultivo de floresta produtiva.

Nesse sentido, o reconhecimento das carências nutricionais dos plantios de pinus, em escala regional, é de fundamental importância para a elaboração da composição nutricional da fertilização. A quantificação de respostas biológicas das plantas ao fornecimento de nutrientes ao mesmo tempo que permite identificar as carências ocorrentes tem o potencial para fornecer indicativos biológicos para determinadas carências nutricionais.

Com base no exposto, o objetivo da presente tese de doutorado é amplificar o conhecimento das carências nutricionais de pinus na região de Jaguariaíva/PR e estudar as adaptações de plantas de *Pinus spp.* para aquisição de nutrientes.

## 2 CAPÍTULO I. PRODUÇÃO DE MADEIRA EM RESPOSTA A FERTILIZAÇÃO E CALAGEM DE *P. TAEDA* L. EM SOLOS DE CERRADO DO BRASIL SUBTROPICAL

### 2.1 RESUMO

Em despeito da média nacional de produtividade alta, existem regiões no Brasil onde baixas taxas de crescimento de pinus são associadas com deficiência de nutrientes no solo. Esse trabalho visa a reposição nutricional em plantios de *Pinus taeda* L. localizados em solos de baixa fertilidade no leste do Paraná, sul do Brasil. As sucessivas colheitas e desbastes de plantios exportam os nutrientes do solo, resultando em uma perda de fertilidade ao longo do tempo. A produtividade regional das plantações poderia ser melhorada através da fertilização e da substituição de nutrientes. O objetivo deste estudo foi caracterizar a produtividade das plantações estabelecidas de *P. taeda* L. após a fertilização e a calagem. Um experimento de omissão de nutrientes com sete tratamentos, em quatro repetições, foi estabelecido em seis plantios de *P. taeda* L. reconhecidamente pobres e que não receberam fertilização. O experimento foi implantado em seis locais no leste do Paraná, no sul do Brasil. Vários parâmetros de crescimento foram mensurados periodicamente por 7 anos após a implantação do experimento. As comparações entre os tratamentos foram feitas usando testes de hipóteses lineares (contrastes). A fertilização resultou em melhoria no crescimento das plantas nos seis locais avaliados. O efeito da fertilização e da calagem variou de acordo com o local. Micronutrientes e ou Zn diminuíram os efeitos positivos de outros nutrientes em quatro locais. A fertilização em plantios estabelecidos de *P. taeda* L. tem potencial para melhoria de produtividade, todavia a aplicação de micronutrientes e calcário sobre a serapilheira de plantios estabelecidos pode ter efeitos deletérios.

Palavras-chave: *Pinus taeda* L., solos de baixa fertilidade, fósforo, NPK.

## 2.2 ABSTRACT

In spite of a high national average for productivity, there are regions in Brazil where pine growth rates are low and associated with nutrient deficient soils. This study looks at nutrient replacement in managed plantations of *Pinus taeda* (L.) located on low fertility soils in eastern Paraná, in southern Brazil. Successive pine plantation harvests and thinnings remove soil nutrients resulting in a loss of fertility over time. Regional plantation productivity could be improved through fertilization and nutrient replacement. The aim of this study was characterize the productivity of established *Pinus taeda* (L.) plantations after fertilization and liming. A nutrient omission experiment with seven treatments replicated four times was established on six existing unfertilized nutritionally poor loblolly pine plantations of six different ages in eastern Paraná, in southern Brazil. Several growth parameters were measured periodically for 7 years after plot treatments. Treatment comparisons were made using linear contrast modeling. Fertilization resulted in improved plant growth in six sites evaluated. The effect of fertilization and liming varied by site. Micronutrient and/or Zn decreased the positive effects of other nutrients on four sites. Fertilization in established plantations of *Pinus taeda* (L.) can increase plantation productivity, but the application of micronutrients and lime on litter of established plantations can have deleterious effects.

Key-words: *Pinus taeda* L., low fertility soils, phosphorus, NPK.



## 2.3 INTRODUÇÃO

O *P. taeda* L., no seu centro de origem (Sudeste dos EUA), apresentou um aumento de produtividade de menos de 100 para mais de 400 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> entre os anos 1940 e 2000. Esse aumento na produtividade representa um acréscimo do incremento médio anual (IMA) de dois para 20 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Fox et al., 2007). Esse aumento é devido à melhoria genética das plantas, qualidade de sementes, controle de ervas daninhas, desbastes, qualidade de sítio e fertilização (Fox et al., 2007; Zhao et al., 2016; Nelson and Bragg, 2016; Sharma et al., 2016; Maggard et al., 2017; Quesada et al., 2017; Albaugh et al., 2017).

Nas condições de sul do Brasil, no norte do estado de Santa Catarina (SC) o *P. taeda* L. apresentou IMA entre 15 e 26 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (Nascimento et al., 2015) e entre 10 e 31 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> no sul do Paraná (Watzlawick et al., 2013). No mínimo 40% da área plantada com *Pinus* no Brasil está localizada no estado do Paraná (ABRAF, 2013b). Munhoz (2011) reportou valores de IMA variando entre 14 e 32 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> em plantações com 8-9 anos na região de Jaguariaíva/PR, demonstrando boa adaptabilidade às condições edafoclimáticas locais.

Historicamente, no sul do Brasil, os plantios de *Pinus* spp. apresentam produtividade comercialmente satisfatória mesmo sem o uso de fertilizantes, e sem a ocorrência de sintomas visuais de deficiência nutricional, criando a ideia de que a fertilização teria importância secundária no cultivo de pinus (Reissmann e Wisniewski, 2015). Esse cenário favoreceu o empobrecimento químico de grandes áreas de solo através de desbastes e colheitas sucessivas, sem a reposição de nutrientes (aplicação de fertilizantes).

Este cenário se agrava em solos de fertilidade extremamente baixa. Desordens nutricionais em *Pinus caribaea* (Morelet) foram relatadas na região do Cerrado, no sudoeste do Brasil (Chaves e Corrêa, 2003, 2005). O quadro seria mais agravado então em ambientes quimicamente sensíveis como o Cerrado, bioma sob o qual se estabeleceram muitos plantios de pinus no sul do Brasil (clima subtropical) (Batista et al., 2015), os últimos remanescentes de Cerrado do estado do Paraná. Os mesmos autores relatam que nessa mesma região ocorre o amarelecimento e necrose das acículas de pinus, culminando em morte prematura de plantas, o que são características de carência severa de nutrientes.

Em última instância, o que tem ocorrido é a conversão de um ambiente sensível (cerrado) em solos ainda mais empobrecidos quimicamente e degradados, resultando na redução do potencial de produtividade de plantas do gênero *Pinus*. A iniciativa mais urgente para solução dessa problemática seria a reposição imediata de nutrientes no sistema. O fato é que a reposição de nutrientes é essencial para manutenção da produtividade a longo prazo (Jacobson et al., 2000; Sixel et al., 2015b)

A aplicação de fertilizantes e calcário em plantios estabelecidos parece ser uma alternativa razoável para a reposição de nutrientes no ecossistema floresta. Assim, o objetivo desse estudo foi caracterizar o efeito da composição nutricional da fertilização sobre a dinâmica da produtividade de plantios de *P. taeda* L. de diferentes idades, estabelecidos no Brasil subtropical.

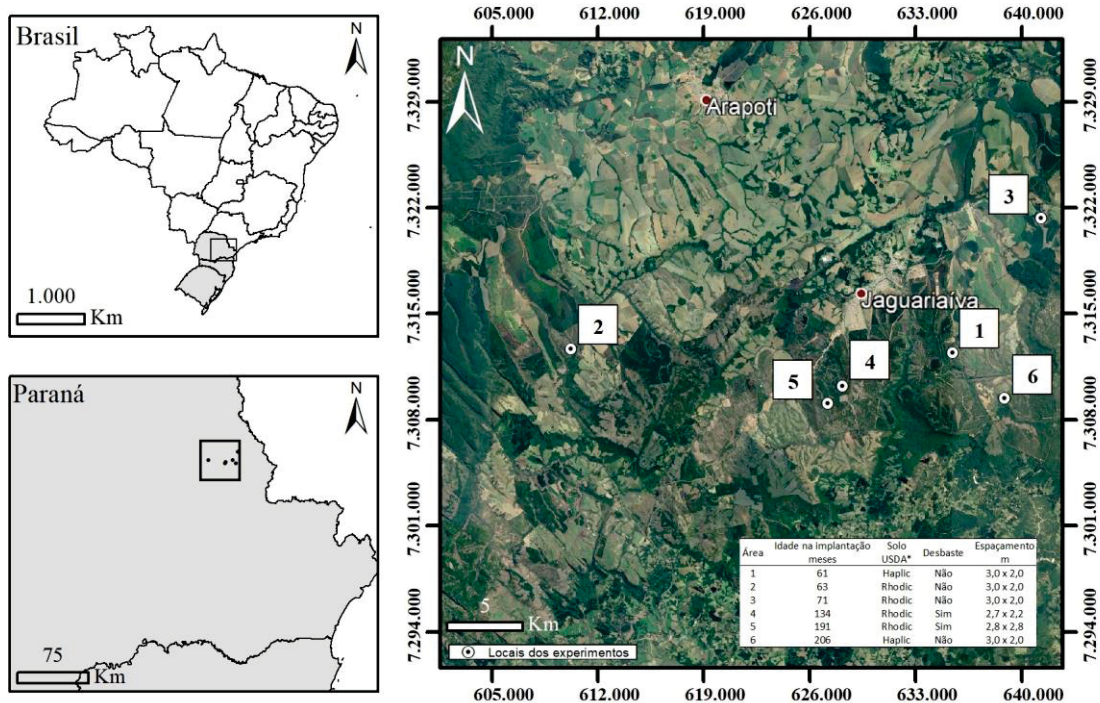
## 2.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.4.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido em seis locais de reflorestamento com *P. taeda* L. no estado do Paraná/BR, um local em Arapoti/PR (J09) e os demais em Jaguariaíva/PR (J11, J12, J13, J36 e J50) (Figura 1.1). Os solos da região são oriundos dos arenitos das formações geológicas Furnas e Itararé, localizadas no segundo planalto paranaense. O clima é Cfb (Subtropical úmido, clima oceânico sem estação seca, com verão ameno), as precipitações medias anuais e temperaturas mensais foram de 1386 mm e 14.8 a 21.9 °C para Arapoti, e 1412 mm e 13.6 a 20.6 °C Para Jaguariaíva (Alvares et al., 2013).

Em ordem de testar o efeito da fertilização e calagem ao longo do ciclo (baseado em um ciclo de 25 anos) de cultivo foram selecionadas áreas com diferentes idades: 5-6 anos (J09, J13 e J50), mais de 10 anos (J11), e mais de 15 anos (J12 e J36).

FIGURA 1.1. Localização das unidades experimentais onde foi conduzido ensaio de omissão de nutrientes em plantios estabelecidos de *Pinus taeda* L., na região de Jaguariaíva/PR, sul do Brasil.



Para os seis sítios estudados foi realizada análise química de solo, até 60 cm de profundidade, no momento anterior a implementação do experimento, os dados são apresentados na Tabela 1.1. As amostras de solo foram obtidas através de trado calador e trado holandês. Nos seis sítios estudados foram observados que os solos são extremamente ácidos, com baixa quantidade de bases trocáveis ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ ), elevada saturação por  $\text{Al}^{3+}$  nos pontos de troca e pobres em P. A classificação dos solos dos sítios estudados e algumas características silviculturais dos plantios são apresentadas na tabela 1.2. Anteriormente a aplicação dos tratamentos foi mensurado a produtividade dos plantios em que o experimento foi implantado, trata de medição inicial de produtividade (tabela 1.3), com esses valores será possível se calcular os valores de incremento em produtividade, a partir da implantação do experimento (adubação),

TABELA 1.1. Características químicas dos solos<sup>1</sup> nos 60 cm superficiais, dos seis plantios estabelecidos de *Pinus taeda* L. no leste do Paraná, Brasil.

	pH	Al <sup>3+</sup>	H + Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	CTC	P	CO	m	SB
	CaCl <sub>2</sub>			cmolc dm <sup>-3</sup>				ppm	g dm <sup>-3</sup>	%	%
J09	4,0	1.0	5.8	0.1	0.1	0.02	6.0	0.2	15.1	78.6	4.2
J11	4,0	1.5	6.4	0.2	0.1	0.02	6.7	1.2	17.5	82.5	4.7
J12	4.0	1.2	6.4	0.1	0.1	0.02	6.6	0.5	17.0	83.3	3.4
J13	4.0	2.0	8.6	0.3	0.1	0.04	9.1	3.8	24.1	80.9	5.2
J36	4.0	1.3	8.1	0.1	0.1	0.03	8.4	0.3	18.2	84.6	2.9
J50	4.1	1.3	5.5	0.2	0.1	0.03	5.8	1.4	20.0	77.9	6.2

<sup>1</sup>pH (CaCl<sub>2</sub> 0.01 mol L<sup>-1</sup>); Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup> (Extraídos com KCl - 1 mol L<sup>-1</sup>); H + Al<sup>3+</sup> (Extração com acetato de cálcio 0.5 mol L<sup>-1</sup>); Carbono Orgânico (CO) (Método volumétrico por oxidação com dicromato de K); K<sup>+</sup> (Extração com Mehlich<sup>1</sup>); Saturação por bases (SB); Saturação por Al<sup>3+</sup> (m); Capacidade de troca de cátions (CTC).

TABELA 1.2. Características gerais das unidades experimentais, localizadas em seis plantios estabelecidos de *Pinus taeda* L. na região de Jaguariaíva/PR, Brasil.

Unidade experimental	Classificação do solo (WRB classification)	Declividade	Cultura anterior	Idade do plantio <sup>1</sup> (meses)	Desb.	Data de plantio	Esp. (m)
J09	Rhodic Ferralsol	3–8 %	<i>Eucalyptus</i> sp.	63	Não	09/09/2003	3.0 x 2.0
J11	Rhodic Ferralsol	3–8 %	<i>P. taeda</i>	134	Sim	17/09/1997	2.7 x 2.2
J12	Rhodic Ferralsol	3–8 %	<i>P. taeda</i>	191	Sim	01/01/1993	2.8 x 2.8
J13	Haplic Cambisol	8–20 %	<i>P. taeda</i>	61	Não	23/10/2003	3.0 x 2.0
J36	Humic Cambisol	3–8 %	<i>P. taeda</i>	206	Não	01/10/1991	3.0 x 2.0
J50	Rhodic Ferralsol	3–8 %	<i>Eucalyptus</i> sp.	71	Não	10/01/2003	3.0 x 2.0

Desb. = Desbaste, Esp. = Espaçamento.<sup>1</sup>Idade dos povoamentos estudados na ocasião da implantação do experimento.

TABELA 1.3. Dimensões médias das árvores de *Pinus taeda* L. cultivadas em unidades experimentais na região de Jaguariaíva/PR, Brasil. Esses dados indicam a condição dos plantios no momento antes da implementação de experimento de omissão de nutrientes, em novembro 2008.

Location	DAP <sup>1</sup>	H	G	VMI	VC	V	IMAc	IMA
	cm	m	m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>		m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup>	
J09	7,72	4.76	7.85	0012	3.69	18.94	0.71	3.65
J11	19.05	11.51	2939	00.16	141.7	157.6	12.59	14.00
J12	28.36	18.13	30.47	00.53	245.8	253.4	15.48	15.96
J13	10.56	5.86	14.95	00.03	21.35	42.89	4.21	8.46
J36	28.58	18.37	31.04	00.55	252.8	260.4	14.75	15.19
J50	14.82	8.51	28.83	00.07	89.74	113.6	15.34	19.42

<sup>1</sup> DAP = Diâmetro na altura do peito. H = Altura. G = Área basal. VMI = Volume médio individual. VC = Volume comercial. V = Volume total. IMAc = Incremento médio anual em CV. IMA = Incremento médio anual em V.

#### 2.4.2 DESENHO EXPERIMENTAL

O mesmo experimento de omissão de nutrientes foi instalado nas seis localidades (Tabela 1.4). O delineamento continha sete tratamentos, criados no sentido de se realizar uma diagnose por omissão de nutrientes. O tratamento completo consistiu de macronutrientes (N, P e K), calcário (Ca, Mg) e micronutrientes (Zn, Cu, B e Mo). Os demais tratamentos foram: 2) -NPK (omissão de NPK); 3) -Micro; 4) -K; 5) -Zn; 6) -Calcário (omissão de Ca e Mg); 7) Testemunha. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições. Cada parcela continha 8 x 8 árvores, as árvores centrais (4 x 4) foram mensuradas. Depois da aplicação dos tratamentos as árvores foram podadas até a altura de 2,0 m.

TABELA 1.4. Conjuntos de nutrientes aplicados em cada tratamento de experimento de omissão de nutrientes implementado em seis plantios estabelecidos de *Pinus taeda* L. na região de Jaguariaíva/PR, Brasil.

Tratamentos	N <sup>1</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Zn	Cu	B	Mo	Calcário
T1: Completo	1	1	1	1	1	1	1	1
T2: - Macro	–	–	–	1	1	1	1	1
T3: - Micro	1	1	1	–	–	–	–	1
T4: - K	1	1	–	1	1	1	1	1
T5: - Zn	1	1	1	–	1	1	1	1
T6: - Calcário	1	1	1	1	1	1	1	–
T7: Testemunha	–	–	–	–	–	–	–	–

<sup>1</sup> Presença = 1; Ausência = –

Cada fonte de fertilizante utilizada foi pesada individualmente e armazenada em sacos plásticos. O calcário foi pesado no próprio local e aplicado logo após a fertilização. Os tratamentos foram aplicados em duas parcelas, em novembro de 2008 e fevereiro de 2010. As aplicações foram feitas manual e superficialmente e em área total da parcela.

Cada aplicação continha 40, 60, 80, 3, 2 e 1,5 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Zn, B e Cu. As fontes foram ureia, superfosfato triplo, cloreto de potássio, sulfato de zinco, ulexita e sulfato de cobre. O Mo foi também fornecido na dose de 20 g ha<sup>-1</sup> na forma de molibdato de sódio. Calcário dolomítico foi aplicado na dose de 1.3 Mg ha<sup>-1</sup>, com 28.9% de CaO e 19.9% de MgO e 89.4% de PRNT.

### 2.4.3 AVALIAÇÕES

Foi realizada uma avaliação inicial (no momento antes da implantação do experimento) (Tabela 1.3) e quatro subsequentes, aproximadamente 2, 3, 4 e 7 anos após a implementação. Todas as avaliações, tanto a inicial quanto as subsequentes, constaram de inventário florestal, mediu se o Diâmetro na altura do peito (DAP) e a altura (H) de todas as árvores uteis da parcela. Os dados foram utilizados para estimar as variáveis: Área basal (G); Volume médio individual (VMI); Volume comercial (VC); Volume total (V); Incremento médio anual em CV (IMAc); Incremento



médio anual em  $V$  (IMA). As variáveis foram estimadas utilizando a solução FlorExcel 3.12.09®.

O objetivo foi avaliar o efeito dos tratamentos após a implantação do experimento. Dessa forma, do valor de cada variável obtida nas avaliações subsequentes foi subtraído o valor na avaliação inicial, obtendo o Incremento após adubação (IAA).

Para as variáveis estimadas, em alguns poucos casos ocorreram valores negativos para a primeira avaliação após a implementação. Esse fenômeno é restrito a parcelas de baixo crescimento. Possivelmente isso seja relacionado à interação entre o fato de serem dados estimados matematicamente com variações interanuais no procedimento analítico da avaliação.

Então, como é teoricamente impossível ocorrer valor negativo (a árvore não diminui de tamanho ao longo do tempo), os valores negativos foram substituídos por zero, indicando apenas ausência de crescimento.

#### 2.4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

As médias dos tratamentos dos IAA's para cada variável, em cada avaliação, são apresentados juntamente com seus desvios padrão. As diferenças estatísticas foram determinadas usando testes de hipóteses lineares (contrastes) e serão apresentadas na Figura 1.4. Não foi realizado nenhum tipo de transformação, exclusão, ou edição nos dados (além das supracitadas). Foram testados 14 contrastes (Tabela 1.5) para cada avaliação, em cada variável. A análise estatística foi realizada utilizando o software R studio v. 0.99.903 - © 2009-2016 R studio, Inc.

TABELA 1.5. Hipóteses lineares testadas (contrastes) para avaliar o efeito dos tratamentos em experimentos de omissão de nutrientes em *Pinus taeda* L. no leste do Paraná, Brasil.

Contraste nº	Efeito Conjunto	Tratamentos contrastantes		
1	Adubação*	Fertilizados	x	Testemunha
2	Adubação	Completo	x	Testemunha
3	NPK+Micro	-Calcário	x	Testemunha
4	NPK+Calcário	-Micro	x	Testemunha
5	Micro+Calcário	-NPK	x	Testemunha
6	BMoCu+NPK+Calcário	-Zn	x	Testemunha
7	NP+Micro+Calcário	-K	x	Testemunha
8	NPK	Completo	x	-NPK
9	NP	-K	x	-NPK
10	K	Completo	x	-K
11	Micro	Completo	x	-Micro
12	BMoCu	-Zn	x	-Micro
13	Zn	Completo	x	-Zn
14	Calcário	Completo	x	-Calcário

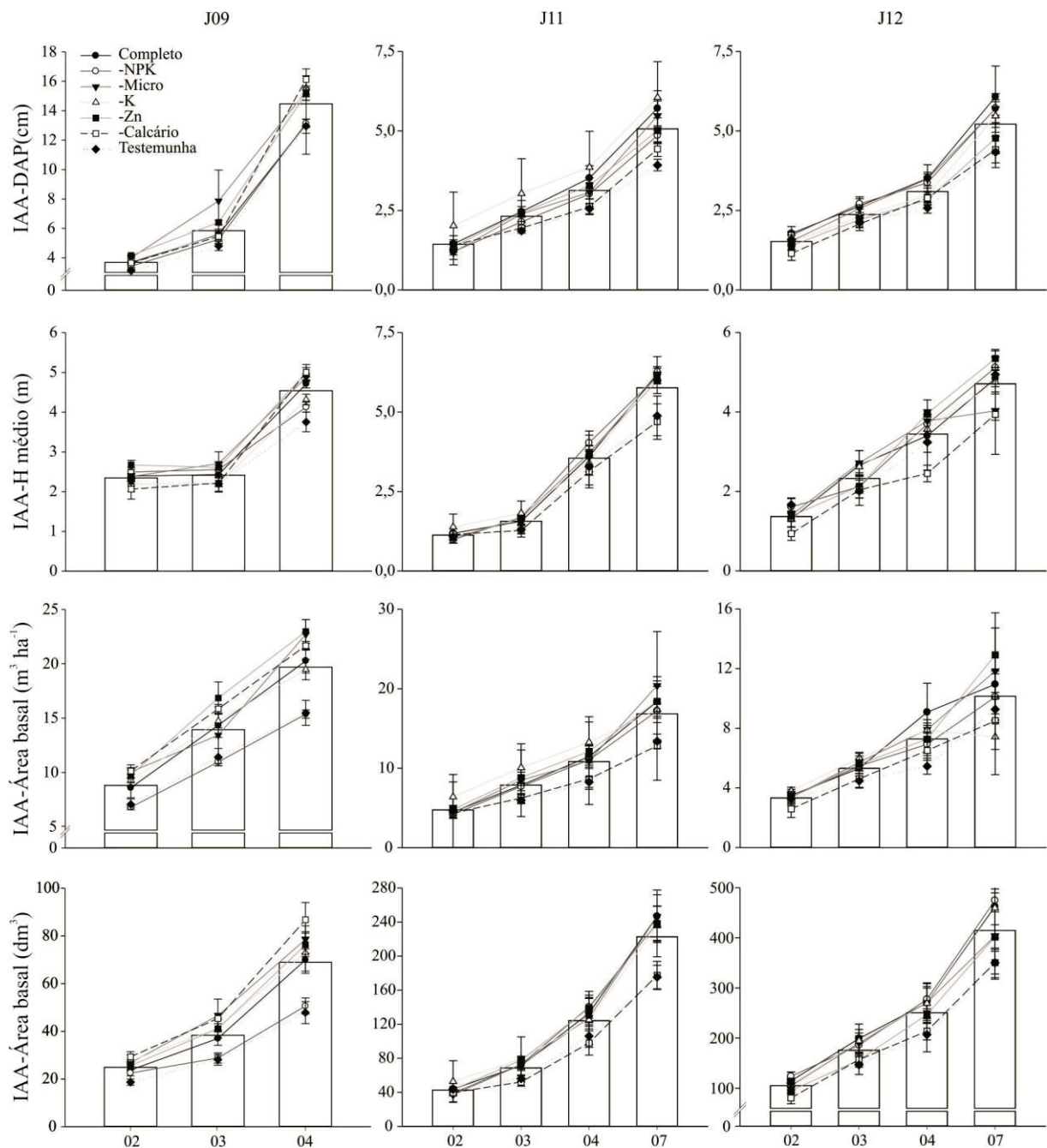
\*Média dos tratamentos fertilizados em comparação com a testemunha.

## 2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.5.1 RESULTADOS

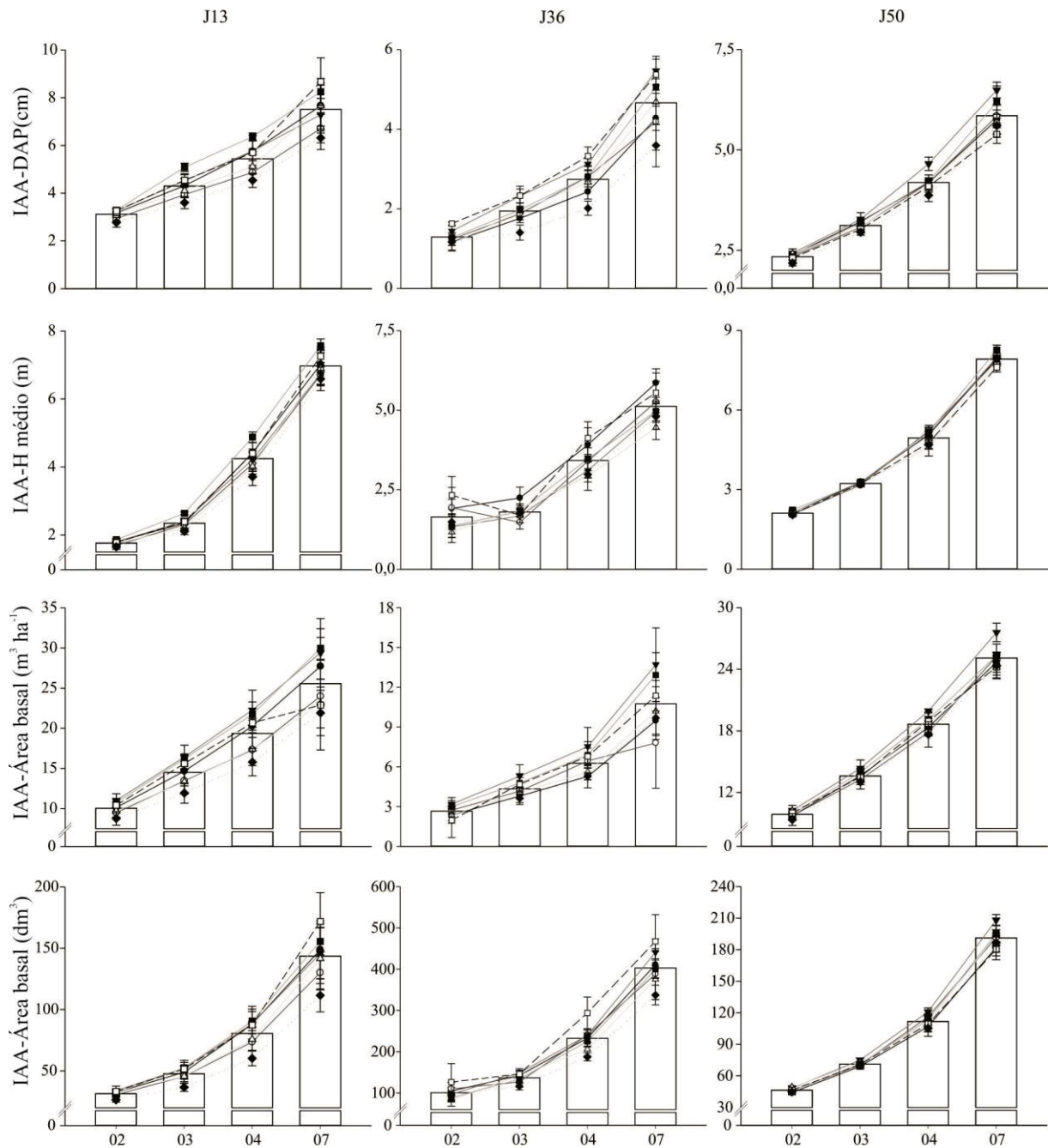
As unidades experimentais J09 e J13 foram as mais responsivas, com os maiores incrementos obtidos, em todas as variáveis avaliadas, nos tratamentos – Calcário e –Zn. Para as unidades J12 e J50 os maiores incrementos foram observados nos tratamentos –Micro e –Zn. Na unidade J36 foram os tratamentos – Calcário e –Micro, na J11 –K e Completo (Figuras 1.2, 1.3, 1.4 e 1.5).

Figura 1.2. Incremento após adubação (IAA) das variáveis analisadas em razão dos tratamentos de fertilização. Áreas experimentais de *Pinus taeda* L. implantadas no polo florestal de Jaguariaíva/PR, Brasil.



Considerando a responsividade aos tratamentos das unidades experimentais, a unidade J09 (cinco anos na implementação) foi a mais responsiva, apresentando resposta a todos os conjuntos de nutrientes que continham NP ou NPK, semelhante a unidade J13 (também com cinco anos na implementação). Nesse critério de responsividade, as unidades J09 e J13 foram seguidas pelas unidades J12, J36, J50, J11 (16, 17, 6 e 11 na ocasião da implementação) (Figuras 1.6 e 1.7).

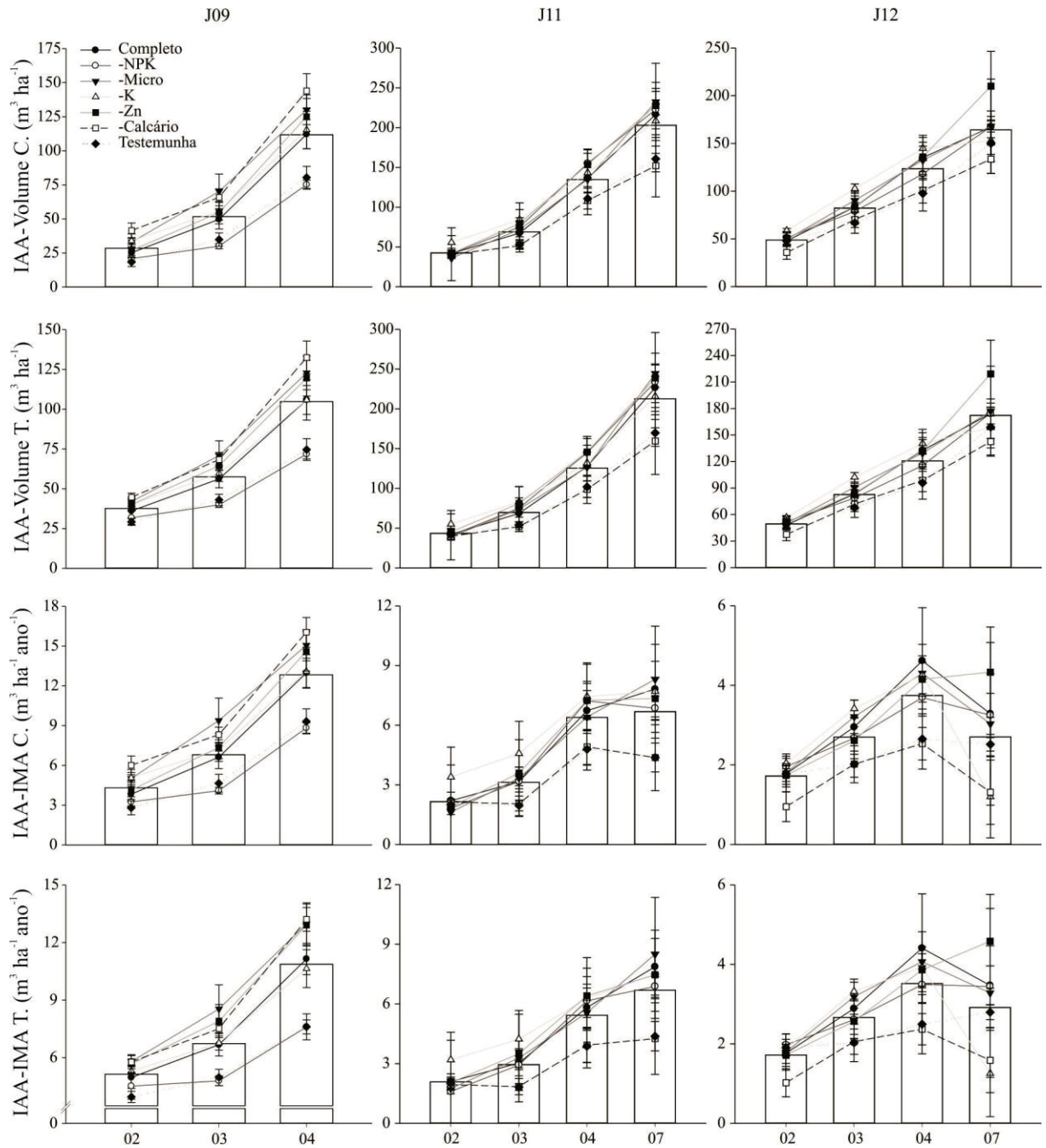
Figura 1.3. Incremento após adubação (IAA) das variáveis analisadas em razão dos tratamentos de fertilização. Áreas experimentais de *Pinus taeda* L. implantadas no polo florestal de Jaguariaíva/PR, Brasil.



Na unidade J09 (mais responsiva), o VMI e V aumentaram aproximadamente 150% no tratamento testemunha, dois anos após a implementação. Para as unidades J13 e J50 esses valores seriam de 100% e 64% no V. As unidades J11, J12 e J36 (11, 16 e 17 anos na implementação), apresentaram aumento de 27%, 20% e 20% (Figuras 1.2 e 1.4).

Assim, não foi observada relação direta entre responsividade e idade do plantio, apenas entre idade e velocidade de crescimento. Indicando que quando há carência de nutrientes a fertilização superficial de plantios estabelecidos é eficiente em fornecer nutrientes. No entanto, árvores jovens crescem mais rápido e tendem a aumentar mais em DAP quando fertilizadas. No entanto, árvores mais velhas possuem maior DAP e V na ocasião da implementação, dessa forma, um menor incremento no DAP representa um acréscimo superior no volume de madeira.

FIGURA 1.4. Incremento após fertilização (IAA) das variáveis analisadas em razão dos tratamentos de fertilização. Áreas experimentais de *Pinus taeda* L. implantadas no polo florestal de Jaguariáva/PR, Brasil.

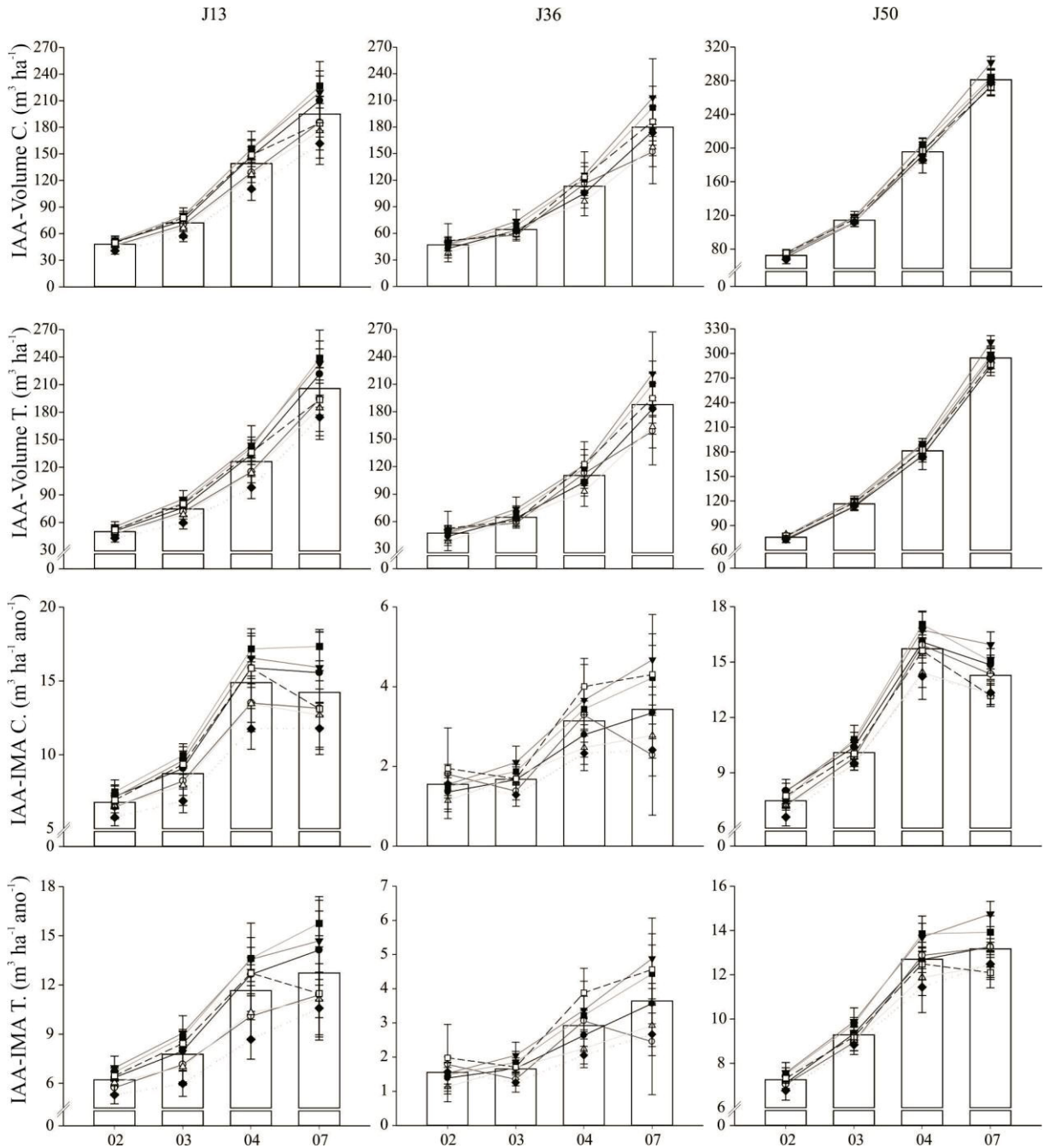


A aplicação dos tratamentos de fertilização e calagem em plantios de *P. taeda* L. (NPK, Ca, Mg, B, Mo, Cu, Zn) resultou em acréscimos de produtividade. Entre os contrastes 1 a 7, que comparam os tratamentos fertilizados com o tratamento Testemunha, quase todos que apresentaram efeito significativo o efeito foi positivo. A única exceção foi o contraste 3 (efeito de NPK + micronutrientes) na altura, VMI e



IAA, apenas na primeira avaliação da unidade J12 (Figuras 1.6 e 1.7), que está relacionado com o desbalanço da aplicação de K em solo com limitação severa de Mg e/ou Ca (calcário), que será discutido posteriormente.

FIGURA 1.5. Incremento após fertilização (IAA) das variáveis analisadas em razão dos tratamentos de fertilização. Áreas experimentais de *Pinus taeda* L. implantadas no polo florestal de Jaguariaíva/PR, Brasil.



Praticamente não houveram diferenças significativas entre os tratamentos fertilizados (contrastes 8 a 14), e nos casos onde ocorreram a maioria foi efeito

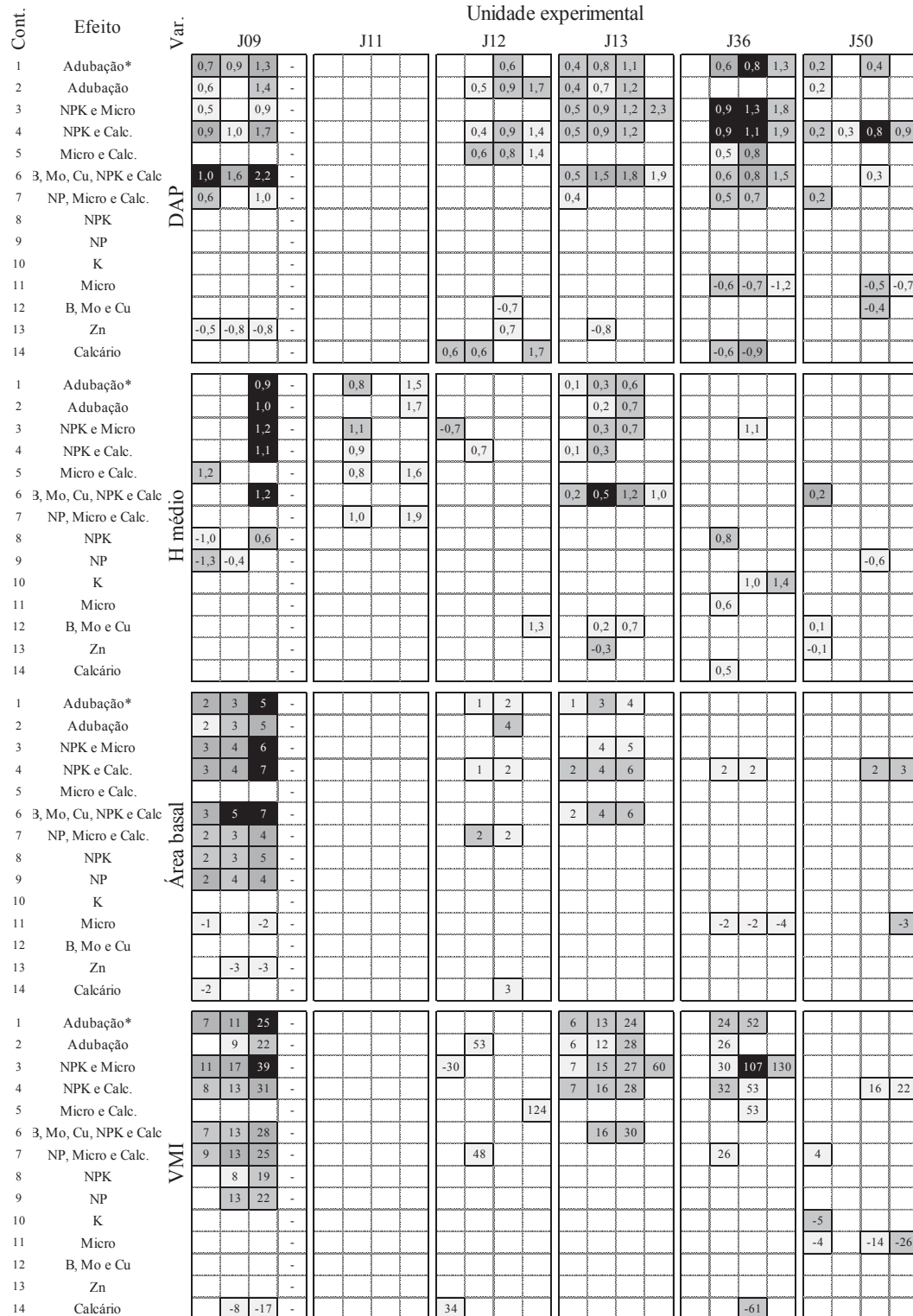
negativo relacionado com efeito deletério de Zn e/ou micronutrientes e/ou calcário nas unidades J09, J13, J36 e J50 (figuras 1.6 e 1.7). As únicas unidades que apresentaram efeito substancial e positivo para algum efeito nos contrastes 8 a 14 foram as unidades J09 (contrastos 8 e 9, efeitos de NPK e NP), e J12 (contraste 14, efeito de calcário), indicando carências específicas mais severas nessas unidades.

O principal fator para incremento em produtividade foi o fornecimento de NP, que pode ser verificado pela quantidade de efeitos significativos nos contrastes que envolvem esse conjunto de nutrientes: Contraste 3 para as unidades J09, J11, J13 e J36; contraste 4 para todas unidades; contraste 6 para J09, J13, J36 e J50; contraste 7 para J09, J11, J12, J36 e J50 (Figuras 1.6 e 1.7).

A deficiência de K pode ser estimada apenas pela diferença entre os contrastes 2 e 7. Foi observado que apenas a unidade J13 apresentou alguma diferença substancial entre esses dois contrastes. Todavia, todos os solos utilizados são muito pobres em K (tabela 1.1). Em outras palavras, em despeito da carência generalizada de K, apenas uma em seis unidades apresentou alguma resposta da fertilização com K.

Os contrastes 11, 12 e 13, que avaliam os efeitos de conjuntos de nutrientes que contenham micronutrientes (Figuras 1.6 e 1.7), mostraram efeitos significativos, e negativos, para o contraste 11 nas unidades J09 e J36, para o contraste 12 nas unidades J12 e J50, e para o contraste 13 nas unidades J09 e J13. A adição de Zn e/ou micronutrientes (contrastos 11, 12 e 13) resultou na redução de aproximadamente 50% dos incrementos em produtividade que seriam proporcionados pelo fornecimento de NPK (figuras 1.6 e 1.7), caracterizando efeito tóxico. No entanto há um efeito positivo de Zn no DAP na unidade J12, e do conjunto B+Cu+Mo para H na unidade J13.

Figura 1.6. Efeito do fornecimento de conjuntos de nutrientes no incremento de variáveis de produtividade, ao longo do tempo, em plantios estabelecidos de *Pinus taeda* L. distribuídos ao longo do polo florestal de Jaguariaíva/PR, Brasil. Os efeitos são estimados através da comparação entre tratamentos contrastantes - contrastes - (Tabela 1.5), as comparações foram realizadas através do teste de contrastes sem transformação.



10% de probabilidade █ 5% █ 1% █ <1% █ DAP=Diâmetro na Altura do Peito, H=Altura Total, G=Área Basal, VMI=Volume Médio Individual, VC=Volume Comercial, Vt=Volume Total, IMAc=Incremento Médio Anual em Volume Comercial, IMAt=Incremento Médio Anual em Volume Total.=-Não há avaliação pois a unidade já havia sido colhida nessa ocasião.

Figura 1.7. Efeito do fornecimento de conjuntos de nutrientes no incremento de variáveis de produtividade, ao longo do tempo, em plantios estabelecidos de *Pinus taeda* L. distribuídos ao longo do polo florestal de Jaguariaíva/PR, Brasil. Os efeitos são estimados através da comparação entre tratamentos contrastantes - contrastes - (Tabela 1.5), as comparações foram realizadas através do teste de contrastes sem transformação.

Cont.	Efeito	Var.	Unidade experimental						
			J09	J11	J12	J13	J36	J50	
1	Adubação*	Volume Comercial	12 18 37 -		18 30	17 33			
2	Adubação								
3	NPK e Micro		23 31 63 -			20 38			
4	NPK e Calc.		15 24 50 -		24	23 45		8	
5	Micro e Calc.								
6	B, Mo, Cu, NPK e Calc.			20 45 -		22 45			
7	NP, Micro e Calc.		16 21 35 -		36 47				
8	NPK			20 37 -					
9	NP			26 40 -	24				
10	K								
11	Micro							-28	
12	B, Mo e Cu								
13	Zn								
14	Calcário		-16 -16 -32 -						
1	Adubação*	Volume Total	10 16 35 -			17 33			
2	Adubação								
3	NPK e Micro		16 25 58 -			21 38			
4	NPK e Calc.		13 21 48 -		23	12 26 46			
5	Micro e Calc.								
6	B, Mo, Cu, NPK e Calc.		11 21 45 -			22 43			
7	NP, Micro e Calc.		11 17 31 -		34 45				
8	NPK			16 34 -					
9	NP			20 34 -	24				
10	K								
11	Micro							-30	
12	B, Mo e Cu								
13	Zn								
14	Calcário		-9 -27 -						
1	Adubação*	IMA Comercial	2 2 4 -		1	2 4		1 2 1	
2	Adubação			2 4 -		1 2		4	1 2
3	NPK e Micro		3 4 7 -		-1	2 4		2	1
4	NPK e Calc.		2 3 6 -		1	3 5		1	3 3
5	Micro e Calc.							1	
6	B, Mo, Cu, NPK e Calc.			3 5 -		2 3 5 6			1 3 2
7	NP, Micro e Calc.		2 3 4 -		1				
8	NPK			3 4 -					
9	NP			3 4 -					
10	K								2
11	Micro								
12	B, Mo e Cu								
13	Zn								
14	Calcário		-2 -3 -		1 1 2				2
1	Adubação*	IMA Total	1 2 4 -		1	1 2 3			1
2	Adubação			2 4 -		1 2			4
3	NPK e Micro		2 3 6 -		-1	2 4			2
4	NPK e Calc.		2 3 5 -		1	2 3 5		1	2 2
5	Micro e Calc.								
6	B, Mo, Cu, NPK e Calc.		2 3 5 -			1 3 5			2 1
7	NP, Micro e Calc.		1 2 3 -		1				1
8	NPK			2 4 -					
9	NP			2 3 -					
10	K								
11	Micro								-1
12	B, Mo e Cu								
13	Zn								
14	Calcário				1 2				

10% de probabilidade ■ . 5% ■ . 1% ■ <1% ■ DAP=Diâmetro na Altura do Peito, H=Altura Total, G=Área Basal, VMI=Volume Médio Individual, VC=Volume Comercial, Vt=Volume Total, IMAc=Incremento Médio Anual em Volume Comercial, IMAt=Incremento Médio Anual em Volume Total.-=Não há avaliação pois a unidade já havia sido colhida nessa ocasião.

## 2.5.2 DISCUSSÃO

A grande magnitude, distribuição e dispersão das respostas de *P. taeda* L. a fertilização e calagem (figuras 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 e 1.7) certamente estão relacionadas com a forma que o solo vem sendo utilizado desde sua conversão em floresta. Cultivos consecutivos sem reposição de nutrientes exaurem o solo e diminuem a sua fertilidade ao longo do tempo (Berthrong et al., 2009; Sixel et al., 2015b). As unidades J09 e J13 foram as mais responsivas a aplicação dos tratamentos (figura 1.2), possivelmente por se tratarem de sítios de menor qualidade, devido a seus baixos valores de crescimento na ocasião da implantação do experimento (tabela 1.3).

Como os aumentos de crescimento estão relacionados com o fornecimento de NP (figuras 1.2, 1.3, 1.4 e 1.5), possivelmente o fator seja o P, visto que em zonas subtropicais não é comum se observar resposta de *P. taeda* L. a fertilização com N. Nesses casos, a fertilização nitrogenada pode reduzir a condutância hidráulica em direção aos estômatos, reduzindo o crescimento da planta (Faustino et al., 2013).

Os resultados desse estudo colaboram com os resultados observados de modo geral quanto à deficiência de P, em solos de cerrado (Tabela 1.1). Baixa quantidade de P no material de origem e alto grau de intemperização explicam esse quadro, aumentando a quantidade de P do solo em formas inativas ou oclusas (Lopes e Cox, 1977). A importância de P para o cultivo de *Pinus* nessas condições de solo, em termos de carência e capacidade de adsorção, foi relatado para *Pinus pinaster* (Aiton) no sul da França (Trichet et al. 2009). Os mesmos autores observaram que uma dose de P entre 17 e 35 kg ha<sup>-1</sup> pode aumentar a produtividade em mais de 40%, reduzindo o tempo de colheita em 4~5 anos. No entanto, Trichet et al. (2008) reportaram que um plantio de *P. pinaster* (Aiton) fertilizado aos cinco anos de idade e avaliado aos 10 aumentou a produtividade em 18% em resposta ao fornecimento de P, e 24% em resposta a fertilização com NPK Ca, Mg, Cu, Mn e Zn.

A despeito dos níveis extremamente baixos de K, em solos com textura média a arenosa, nos sítios aqui estudados (tabela 1.1), houve baixa resposta do *P. taeda* L. a fertilização com K (figuras 1.2 a 1.7). O que pode ser compreensível considerando que o conteúdo de K nas plantas pode estar associado com a fração

não trocável do K no solo, indicando grande habilidade de aquisição de formas pouco solúveis de K por *P. taeda* L. (Alves et al., 2013).

Houveram efeitos limitantes de micronutrientes, Zn e calcário nas unidades J09, J36 e J50 (figuras 1.6 e 1.7). Em um estudo anterior foi observado que a aplicação de calcário aumentou consideravelmente a concentração de Ca e Mg na serrapilheira, ao menos nas unidades J09 e J13 (Batista et al. 2015). Foi também observado, nas mesmas unidades, que Cu e Zn podem se acumular também na serapilheira, resultando na ocorrência de concentrações superiores a 500 e 200 mg kg<sup>-1</sup> no horizonte mais humificado da serapilheira (Schneider, 2011, Motta et al 2014). Essas informações adquirem relevância sabendo que a serapilheira de *P. taeda* L. pode ser colonizada por pelo menos 16x10<sup>3</sup> km ha<sup>-1</sup> de raízes (Lopes et al., 2010a; Adam, 2015). Também não pode ser descartada a possibilidade de que a calagem possa ter resultado em efeito negativo na colonização micorrízica das raízes da serapilheira (Lehto, 1994). Winagraski (2014) reportou uma redução dramática na colonização micorrízica de raízes de *P. taeda* L. em razão da calagem na unidade J50, de 65% para menos de 25%.

As quantidades de P, K, Ca e Mg aplicadas são comparáveis com o total acumulado na biomassa de toda parte aérea de plantios estabelecidos de *P. taeda* L. consideravelmente mais desenvolvidos do que o presente estudo (Sixel et al., 2015b). As doses de micronutrientes foram delimitadas da mesma forma que os macronutrientes, foram baseadas na Comissão de Química do Solo e Fertilidade – RS/SC (2004). Então, o que temos aqui é a aplicação de nutrientes equivalente ao total exportado em plantios estabelecidos.

Plantios de *P. taeda* L. em Telêmaco Borba/PR e Ponta Grossa/PR demonstraram melhor crescimento com o aumento da concentração de Zn nas acículas (Reissman e Zöttl, 1987; Reissmann e Wisnieski, 2000). No entanto, por causa da dose e da forma como o Zn foi fornecido no presente estudo, foi possível observar apenas efeito deletério em decorrência da aplicação desse micronutriente (figuras 1.6 e 1.7). Com relação a dose, com o aumento abrupto da concentração de Cu e Zn na serapilheira (local com grande concentração de raízes finas) a redução do crescimento do *P. taeda* L. nas unidades J09, J13, J36 e J50 é compreensível.

Quanto ao efeito positivo do calcário na unidade J12 (figuras 1.6 e 1.7), infere-se que seja efeito do fornecimento de Mg, visto que os sintomas observados nas plantas dessa unidade são condizentes ao observado para plantações de *Pinus*

*radiata* (D. Don) na Nova Zelândia; amarelecimento da parte distal de acículas velhas (Will, 1978). Nessa unidade também foi observado efeito negativo da aplicação de NPK, quando realizada sem calcário, que é um indicativo de um efeito competitivo entre K e Mg, também relatado para *P. radiata* (Sun e Payn, 1999).

Dessa forma, para calcário e micronutrientes, o método de aplicação utilizado pode estar limitado a quantidade de serapilheira sobre o solo. Esse problema pode não ocorrer na condição de sudeste dos EUA, onde a serapilheira é costumeiramente queimada entre os ciclos de Pinus (Carter e Foster, 2004). Finalmente, o aumento de H proporcionalmente maior do que o aumento em DAP (figuras 1.6 e 1.7), devido a aplicação dos nutrientes em plantios de *P. taeda* L. foi previamente relatado por Moro et al. (2014). A aplicação de NPK em árvores de 1 e 9 anos de idade aumentou o DAP e H e 10 e 50%, respectivamente (Moro et al., 2014).



## 2.6 CONCLUSÕES

Para nutrientes como o P, a fertilização superficial em plantios estabelecidos de *P. taeda* L. em solos de Cerrado de baixa fertilidade, no sul do Brasil, é eficiente em aumentar a produtividade de madeira por pelo menos sete anos, mesmo em plantações mais velhas. A fertilização de *P. taeda* L. nas idades de entre 5 e 17 anos resulta em acréscimo de produtividade de madeira por unidade de fertilizante aplicado quanto mais velho for o plantio. No entanto, cuidado deve ser tomado com a quantidade de micronutrientes e/ou Zn e/ou calcário a aplicar sobre a serapilheira de plantios estabelecidos.

## 2.7 REFERÊNCIAS

- ADAM, W. M. **Composição química da serapilheira e raízes finas de *Pinus taeda* sob fertilização e calagem**. Universidade Federal do Paraná; 2015.
- ALBAUGH, T. J., FOX, T. R., RUBILAR, R. A., COOK, R. L., AMATEIS, R. L., BURKHART, H. E. Post-thinning density and fertilization affect *Pinus taeda* stand and individual tree growth. **Forest Ecology and Management**. v. 396. p. 207–216. 2017.
- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., DE MORAES, GONÇALVES, J. L., SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**.v. 22. p.711–728. 2013.
- ALVES, M. J. F., MELO, V. DE F., REISSMANN, C. B., KASEKER, J. F. Reserva mineral de potássio em latossolo cultivado com *Pinus taeda* L. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**.v. 37. p.1599–1610. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário Estatístico ABRAF 2013: Ano Base 2012**. Brasília; 2013
- BATISTA, A. H., MOTTA, A. C. V. , REISSMANN, C. B., *et al* () Liming and fertilisation in *Pinus taeda* plantations with severe nutrient deficiency in savanna soils. **Acta Scientiarum. Agronomy**. v. 37 p.117–125. 2015. DOI: 10.4025/actasciagron.v37i1.18061
- BERTHRONG, S. T., JOBBÁGY, E. G., JACKSON, R. B. A global meta-analysis of soil exchangeable cations, pH, carbon, and nitrogen with afforestation. **Ecological Applications**. v.19. p. 2228–2241. 2009.
- CARTER, M. C., FOSTER, C. D. Prescribed burning and productivity in southern pine forests: A review. **Forest Ecology and Management**. v.191. p.93–109. 2004.
- CHAVES, R. DE Q., CORRÊA, G. F. Micronutrients in the soil - *Pinus caribaea* Morelet system with yellowing of the needles followed by senescence and death. **Revista Árvore**. v. 27. p. 769–778. 2003.
- CHAVES, R. DE Q., CORRÊA, G. F. Macronutrients in the soil - *Pinus caribaea* Morelet system with yellowing of the needles followed by senescence and death. **Revista Árvore**. v. 29. p. 691–700. 2005.
- FAUSTINO, L. I., BULFE, N. M. L., PINAZO, M. A., MONTEOLIVA, S. E., GRACIANO, C. Dry weight partitioning and hydraulic traits in young *Pinus taeda* trees fertilized with nitrogen and phosphorus in a subtropical area. **Tree Physiology**. v. 33. p. 241–251. 2013.
- FILHO, N. F. DE B., SCHUMACHER, M. V., NEVES, J. C. L., BARROS, N. F., VALADARES, S. V. Tree Growth and Nutrient Dynamics in Pine Plantations in Southern Brazil. **Brazilian Journal of Soil Science**. v. 41. p. 1–12. 2017.

FOX, T., ALLEN, H., ALBAUGH, T. Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the southern United States. **Southern Journal of Applied Forestry**. v. 31. p. 5–11. 2007a.

FOX, T. R., JOKELA, E. J., ALLEN, H. L. The Development of Pine Plantation Silviculture in the Southern United States. **Journal of Forestry**. v.105. p. 337–347. 2007b.

JACOBSON, S., KUKKOLA, M., MÄLKÖNEN, E., TVEITE, B. Impact of whole-tree harvesting and compensatory fertilization on growth of coniferous thinning stands. **Forest Ecology and Management**. v. 129. p. 41–51. 2000.

LEHTO, T. Effects of soil pH and calcium on mycorrhizas of *Picea abies*. **Plant Soil**. v.163. p. 69–75. 1994.

LOPES, A. S., COX, F. R. A Survey of the Fertility Status of Surface Soils Under “Cerrado” Vegetation in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**. v. 41. p. 742–747. 1977.

LOPES, V. G., SCHUMACHER, M. V., CALIL, F. N., VIERA, M., WITSCHORECK, R. *Pinus taeda*. **Ciência Florestal**. v. 20. p. 569–578. 2010.

MAGGARD, A. O., WILL, R. E., WILSON, D. S., MEEK, C. R., VOGEL, J. G. Fertilization can compensate for decreased water availability by increasing the efficiency of stem volume production per unit of leaf area for loblolly pine (*Pinus taeda*) stands. **Canadian Journal of Forest Research**. v. 47. p. 445–457. 2017

MORO, L., GATIBONI, L. C., SIMONETE, M. A., CASSOL, P. C., CHAVES, D. M. Response of one-, five-, and nine-year-old *Pinus taeda* to NPK fertilization in southern brazil. **Brazilian Journal of Soil Science**. v. 38. p. 1181–1189. 2014.

MUNHOZ, J. S. B. **Caracterização da produtividade florestal e dos padrões de crescimento de *Pinus taeda* L. no sul do Brasil através de análise de tronco**. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - ESALQ, USP, Piracicaba, 2011. doi:10.11606/D.11.2011.tde-28042011-162045.

NASCIMENTO, F. A. F. DO, DIAS, A. N., FIGUEIREDO FILHO, A., MIRANDA, G. DE M., ARCE, J. E. Sistema de crescimento e produção para povoamentos de *Pinus taeda* na região norte de Santa Catarina. **Cerne**. v. 21. p. 235–242. 2015.

NELSON, A. S., BRAGG, D. C. Multidecadal response of naturally regenerated southern pine to early competition control and commercial thinning. **Forest Science**. v. 62. p.115–124. 2016.

QUESADA, T., PARISI, L. M., et al. Genetic control of growth and shoot phenology in juvenile loblolly pine (*Pinus taeda* L.) clonal trials. **Tree Genetics and Genomes**. v. 13. 2017.

- REISSMAN, C. B., ZÖTTL, H. W. Problemas nutricionais em povoamentos de *Pinus taeda* em áreas do arenito da formação Rio Bonito-Grupo Guatá. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**. p. 75–80. 1987.
- REISSMANN, C. B., WISNIEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de Pinus. In: GONÇALVES, J. L. M. BENEDETTI, V., organizador. **Nutrição e fertilização florestal**. 3º ed Piracicaba: IPEF. p. 135–166. 2015.
- ROY, E. D., RICHARDS, P. D., et al. The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**.v. 2. p. 2–7. 2016.
- SHARMA, S., ADAMS, J. P., SCHULER, J. L., FICKLIN, R. L., BRAGG, D. C. Effect of seedling stock on the early stand development and physiology of improved loblolly pine (*Pinus taeda* L.) seedlings. **IForest**. v. 9. p. 690–695. 2016.
- SIXEL, R. M. DE M., ARTHUR JUNIOR, J. C., et al. Sustainability of wood productivity of *Pinus taeda* based on nutrient export and stocks in the biomass and in the soil. **Brazilian Journal of Soil Science**. p. 1416–1427. 2015.
- SUN, O. J., PAYN, T. I. M. W. Magnesium nutrition and photosynthesis in *Pinus radiata*: clonal variation and influence of potassium. **Tree physiology**. v. 19. p. 535–540. 1999.
- TRABAQUINI, K., GALVÃO, L. S., FORMAGGIO, A. R., DE ARAGÃO, L. E. Soil, land use time, and sustainable intensification of agriculture in the Brazilian Cerrado region. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 189. p. 70. doi: 10.1007/s10661-017-5787-8.
- TRICHET, P., LOUSTAU, D., LAMBROT, C., LINDER, S. Manipulating nutrient and water availability in a maritime pine plantation: effects on growth, production, and biomass allocation at canopy closure. **Annals of Forest Science**. v. 65. p. 814–814. 2008.
- TRICHET, P., BAKKER, M. R., et al. France: The Importance of Phosphorus as a Fertilizer. **Forest Science**. v. 55. p. 390–402. 2009.
- WATZLAWICK, L. F., CALDEIRA, M. V. W., et al. Aboveground stock of biomass and organic carbon in stands of *Pinus taeda* L. **Cerne**. v. 19. p. 509–515. 2013.
- WILL, G. M. Nutrient deficiencies in *Pinus radiata* in New Zealand. **New Zealand Journal of Forestry Science**. v. 8. p. 4–14. 1978.
- WINAGRASKI, E. **Dinâmica de ectomicorrizas em um plantio adulto de *Pinus taeda* submetido a adubação e calagem no município de Jaguariaíva, PR**. 68p. 2014.
- ZHAO, D., KANE, M., et al. Maximum response of loblolly pine plantations to silvicultural management in the southern United States. **Forest Ecology and Management**. v. 375. p. 105–111. 2016.

### 3 CAPÍTULO II: FERTILIZAÇÃO DE *P. taeda* L. EM ARAPOTI/PR: PRODUTIVIDADE DE MADEIRA, DE SERAPILHEIRA E RAÍZES NA SERAPILHEIRA

#### 3.1 RESUMO

Florestas plantadas de *P. taeda* L. em solos de arenito, na região de Arapoti/PR, apresentam produtividade frequentemente limitada por problemas nutricionais. Nessas condições, o presente experimento pretendeu caracterizar o efeito da fertilização em *P. taeda* L. na produtividade, acúmulo de serapilheira e a distribuição de raízes na serapilheira. O objetivo deve ser atingido através da coleta de dados e material de um experimento de diagnose nutricional por omissão de nutrientes, que contempla os tratamentos: Completo, -NPK, -Micro, -K, -Zn, -Calcário e Testemunha (Duas aplicações de 40, 60, 80, 3, 2 e 1,5 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Zn, B e Cu, Mo na dose de 20 g ha<sup>-1</sup> e 1,3 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário). Os tratamentos de fertilização foram aplicados quando o plantio tinha cinco e sete anos e a coleta quando o plantio tinha 12 anos. A maior limitação é a carência de P, a dose de 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> resulta em aumentos, dependendo dos conjuntos de nutrientes aplicados conjuntamente, entre 60 e 122 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de volume comercial. O incremento de produtividade proporcionado pela fertilização foi limitado pelos efeitos deletérios de Zn e calcário, as doses de 6 kg ha<sup>-1</sup> de Zn e 2,6 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário reduzem em média 50% do incremento que seria proporcionado pela fertilização sem esses fertilizantes. Apesar da carência generalizada de K nos solos de Arenito na região de Arapoti, não foi verificada resposta para a adição desse nutriente no presente experimento, a carência relativa de K foi sanada por adaptações na ciclagem de acículas (O tratamento -K, o Testemunha e os demais apresentaram, em média 52,5, 25 e 40 ± 4 Mg ha<sup>-1</sup> MS de serapilheira) e dimensão do sistema radicular (300x10<sup>3</sup> km ha<sup>-1</sup> de raízes na serapilheira no tratamento -K, no tratamento completo esse valor foi de 140 10<sup>3</sup> km ha<sup>-1</sup>), possivelmente envolvendo distribuição do K aplicado. A fertilização com B, Cu e Mo em conjunto tem potencial para aumentar o crescimento das árvores de maior porte em plantio de *P. taeda* L. em Arapoti/PR.

Palavras-Chave: Sítio florestal, IMA, Produtividade de madeira.

### 3.2 ABSTRACT

Planted forests of *P. taeda* L. in sandstone soils, at Arapoti/PR region, usually present limited productivity by nutritional problems. At those conditions, the present experiment intends to characterize the effect of fertilization in *P. taeda* L. at the productivity, litter accumulation and distribution of roots in the litter. The objective must be achieved through the materials and data collection of a nutritional diagnosis experiment by the nutrients omission, that contemplates the treatments: Complete, -NPK, -Micro, -K, -Zn, -Lime and Control (Two applications of 40, 60, 80, 3, 2 and 1.5 kg ha<sup>-1</sup> of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Zn, B and Cu, Mo at the dose 20 g ha<sup>-1</sup> and 1.3 Mg ha<sup>-1</sup> of dolomitic lime). The fertility treatments were applied when the planting was five and seven years old and the collection when the planting was twelve years old. The bigger limitation is the lack of P, the dose of 120 kg ha<sup>-1</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> results in increases, depending of the sets of nutrients applied together, between 60 and 122 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> in commercial volume. The productivity increment proportionated by the fertilization was limited by the deleterious effects of Zn and calcareous, the doses of 6 kg ha<sup>-1</sup> of Zn and 2.6 Mg ha<sup>-1</sup> of lime reduces on average of 50% of the increment that would be proportionated by the fertilization without those fertilizers. Despite the generalized lack of K in the sandstone soils at the Arapoti region, no response was verified for the addition of this nutrient in the present experiment, the relative lack of K was healed by adaptations in the cycling of the needles (The control -K, treatment and the others presented, the average of 52.5, 225 and 40 ± 4 Mg ha<sup>-1</sup> DM of the litter) and the dimension of its root system (300x10<sup>3</sup> km ha<sup>-1</sup> of roots in the litter at the treatment -K, in the complete treatment this amount was of 140 10<sup>3</sup> .km ha<sup>-1</sup>), possibly involving the distribution of the K applied. The fertilization of B, Cu and Mo together have the potential to increase the bigger trees growth in the planting of *P. taeda* L. in Arapoti/PR.

Key-Words: Forestry site, MAI, Wood yield.

### 3.3 INTRODUÇÃO

O estado do Paraná possui a 3ª maior área de terra coberta com florestas plantadas do Brasil (817.566 ha), e dessa área,  $\frac{3}{4}$  é ocupada por Pinus (ABRAF, 2013a). A região de Arapoti contempla um dos maiores maciços florestais do estado.

A espécie *P. taeda* L. apresenta capacidade elevada de absorção de nutrientes (Alves et al., 2013; Motta et al., 2014) e exploração de ambientes terrestres (solo, serapilheira, rochas de arenito), podendo apresentar raiz pivotante com mais de 4.0 m de profundidade. Apresenta ótima adaptação às condições edafoclimáticas dos estados do Sul do Brasil (Paraná-PR, Santa Catarina-SC e Rio grande do Sul-RS) (Schumacher et al., 2008b; Viera e Schumacher, 2009, 2010; Piovesan et al., 2012; Lopes et al., 2013; Moro et al., 2014a; Motta et al., 2014; Batista et al., 2015). O resultado é ter se tornado a principal espécie de Pinus utilizada em plantios comerciais nessa região.

Em solos oriundos de arenito no estado do PR (Incluindo a região de Arapoti), há relatos de problemas nutricionais em plantios comerciais de *P. taeda* L., que envolvem desde o amarelecimento da parte distal das acículas do terço superior da árvore até morte prematura de plantas (Reissmann e Zöttl, 1987; Batista et al., 2015). Dessa mesma forma, em uma condição extrema de acidez e conteúdo de nutrientes ( $\text{pH(KCl)} 4.4 \pm 0.2$  e  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} = 0.1$ ) em solo de Cerrado, o cultivo de *P. caribaea* M. também apresenta amarelecimento das acículas e morte precoce de plantas (Chaves e Corrêa, 2005). Os autores relatam que a pobreza é tão acentuada que os problemas nutricionais se intensificam pelo simples acúmulo de nutrientes na serapilheira. Em um Latossolo de Cerrado, a produtividade de *P. caribaea* M. pôde ser estimada pelo pH da camada 0.10-0.20m do solo, dentro do intervalo 4.0~4.7 a produtividade de madeira oscila entre 27 e 37  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$  (Barbosa et al., 2012).

Por outro lado, em um Cambissolo oriundo agora de rocha vulcânica extrusiva básica (basalto) ( $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}=4.7$ ,  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ = 3.8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ; P extraído=2.4  $\text{mg kg}^{-1}$ ) um plantio de *P. taeda* L. recebeu uma dose de polpa celulósica (resíduo alcalino) para aumentar o  $\text{pH}_{\text{SMP}}$  para 5.5 (20.3  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) e não apresentou alteração alguma no crescimento (Pértile et al., 2012). O mesmo tipo de resíduo aplicado no plantio, na dose de 20  $\text{Mg ha}^{-1}$ , resultou em 78% de aumento na biomassa de fuste de plantas de *P. taeda* L. com sete anos de idade em plantio localizado em



Arapoti/PR, submetido a uma condição de elevada acidez ( $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}=3.9$ ,  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}+\text{K}^+=0.43 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ;  $\text{P extraído}=1.0 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Rodrigues, 2004).

O uso do resíduo não permite identificar quais nutrientes são mais responsáveis pela melhoria no crescimento das plantas. Por outro lado, a responsividade à fertilização, de plantios de Pinus estaria mais relacionada com o índice de sítio do que com algum índice de fertilidade do solo individualmente (por exemplo: pH, bases trocáveis, P) (Pinno et al., 2012). Dessa forma, os problemas nutricionais observados na região de Arapoti/PR possivelmente sejam resultado de um quadro grave e complexo de carência multinutricional.

Após a implantação de florestas em solos muito pobres em nutrientes e extremamente ácidos da região de Arapoti-PR, é no segundo ou terceiro cultivo de pinus (sem fertilização) que se observa a ocorrência do supracitado sintoma visual de carência nutricional, amarelecimento da porção basal das acículas no terço médio da planta (Batista et al., 2015). A ocorrência do sintoma é um forte indicativo de esgotamento de recursos nutricionais edáficos e consequente degradação. Dessa maneira, um aumento de produtividade de madeira obtido através de fertilização não é apenas comercial, significa também economia de área de terra devido a maior produtividade, conservação dos solos submetidos ao cultivo de florestas e melhor fornecimento de recursos florestais.

A tentativa de reversão de imediato desse quadro através da fertilização de plantios estabelecidos parece plausível. Dessa forma, o melhor entendimento das carências nutricionais de plantios de *P. taeda* L., que pode ser avaliado pelo efeito da adubação na produtividade, nas condições locais da região de Arapoti/PR (solos pobres, extremamente ácidos, oriundos de arenito, porém profundos), é de vital importância no manejo nutricional de plantios de Pinus estabelecidos em condições semelhantes.

Na região sul do Brasil é comum a ocorrência de grande quantidade de serapilheira em plantios estabelecidos de pinus. A serapilheira é o acúmulo de material vegetal depositado sobre o solo (Schumacher et al. 2008b; Viera and Schumacher 2009, 2010; Batista et al. 2015; Sixel et al. 2015). Em última instância, a serapilheira acumulada seria uma consequência prática da diferença entre a deposição e decomposição desse material depositado.

Em magnitude geográfica local, desconsiderando o clima, que afeta diretamente a taxa de decomposição, dentre os fatores que contribuem para o

acúmulo de serapilheira, possivelmente o primordial seja a quantidade de deposição de material (Piovesan et al., 2012; Krishna e Mohan, 2017). Todavia, também há a ação microbiológica do material, afetada pelo seu teor nutricional (Kaspari et al., 2008; Lin et al., 2017), conteúdo de compostos fenólicos, terpenos e arginina (Kanerva et al., 2008; Chernobrovkina et al., 2016; Mateirć et al., 2016; Ferrenberg et al., 2017). A interação entre a quantidade depositada e o acumulado foi verificado anteriormente em *P. taeda* L. no Paraná, onde foi verificado que a relação depositado ( $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1} \text{ DM}$ )/Acumulado (Espessura da serapilheira em cm) passou de 1.7 para 0.7, de um sítio de baixa para um de alta produtividade (Wisniewski, 1989; Trevisan, 1992). Nesse sentido, no caso da fertilização superficial de um plantio estabelecido de pinus, também ocorre enriquecimento nutricional direto do meio através da solubilização das fontes de nutrientes aplicadas (Batista et al., 2015), o que também tem potencial para afetar a decomposição do material. A serapilheira recalcitrante de *P. sylvestris* foi preparada para o plantio de *Picea abies* através da fertilização com N, P, K, Ca e Mg, após 20 anos a taxa de acúmulo de serapilheira foi reduzida a 1/3 com a fertilização (Jandl et al., 2003). Os autores relatam que a fertilização aumentou a atividade biológica com tal intensidade que chegou a ser verificado o processo de escurecimento do perfil do solo devido a lixiviação de matéria orgânica solúvel.

A serapilheira se caracteriza como o ponto de convergência nutricional dentro do ciclo geoquímico natural de ecossistemas florestais. Em plantios estabelecidos de Pinus a maior parte dos nutrientes absorvidos pelas raízes é oriunda da serapilheira (Switzer and Nelson, 1972). Esses valores foram estimados em 85, 85 e 68% para N, P e K em *P. montezumae* L. (Lopez-Escobar et al., 2017).

As raízes de espécies florestais podem apresentar uma série de adaptações às variações dos índices de fertilidade química do ambiente (Helmisaari e Hallbäck, 2000; Bakker et al., 2009; Lopes et al., 2013; Wang et al., 2016). Desse modo, o conhecimento sobre a distribuição de raízes na serapilheira de plantios de pinus estabelecidos em função da fertilização superficial ganha relevância.

Portanto, o objetivo do presente estudo é investigar o efeito da fertilização superficial na produtividade de madeira para serraria, conteúdo de serapilheira e distribuição radicular de um plantio de *P. taeda* L. estabelecido em Arapoti/PR.

### 3.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no município de Arapoti/PR, localizado no segundo planalto paranaense. Nessa região a formação geológica corresponde ao arenito Itararé (Mineropar, 2010). A vegetação nativa da região é predominantemente Cerrado e o clima é uma transição entre subtropical com verões quentes (Cfa) e subtropical com verões amenos (Cfb) (Alvares et al., 2013). A análise química de solo anterior a implantação do experimento revela baixa disponibilidade de nutrientes elevada acidez e saturação por Al (Tabela 2.1).

TABELA 2.1. Atributos químicos do solo na camada de 0-60 cm da área de estudo, em Arapoti – PR, Brasil

	pH CaCl <sub>2</sub>	pH SMP	Al <sup>3+</sup>	H+Al	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	CTC	P	C	m	V
					cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>				ppm	g dm <sup>-3</sup>	%	%
J09	4.0	5.8	1.0	5.8	0.1	0.1	0.02	6.02	0.2	15.1	78.6	4.2

<sup>2</sup> pH (CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>); Ca<sup>2+</sup>. Mg<sup>2+</sup>. Al<sup>3+</sup> (extraídos com KCl 1mol L<sup>-1</sup>); H + Al<sup>3+</sup> (acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup>); carbono orgânico (CO) (método volumétrico com dicromato de potássio); K<sup>+</sup> e P (extração com Mehlich-1); saturação por bases (SB); saturação com Al<sup>3+</sup> (m); capacidade de troca de cátions (CTC).

O plantio de *P. taeda* L. utilizado no presente estudo foi implantado em 09/09/2003, as mudas foram plantadas com espaçamento de três metros entre linhas e dois metros entre plantas. As mudas são provenientes de sementes e foram cultivadas em tubetes. O experimento foi implantado quando o plantio tinha 63 meses de idade, em novembro de 2008. A colheita e obtenção das variáveis dendrométricas, acículas e a coleta de serapilheira ocorreram no mês de novembro de 2015.

O experimento contém sete tratamentos, que foram concebidos como diagnose nutricional por omissão. O tratamento Completo constou de macronutrientes (NPK), calcário (Ca e Mg) e micronutrientes (Zn, Cu, B e Mo). Os demais tratamentos foram: 2) – NPK (Omissão de NPK), 3 – Micro, 4 – K, 5 – Zn, 6) – Calcário, e 7) Testemunha. Quatro repetições cada, no delineamento experimental blocos ao acaso.

Cada fonte de fertilizante utilizadas, para cada parcela, foi pesada individualmente e armazenadas em sacos plásticos. O calcário foi pesado no local e aplicado logo após a fertilização. Os tratamentos foram aplicados em duas parcelas,

a primeira em novembro de 2008 e a segunda em fevereiro de 2010. A aplicação foi feita de forma manual, superficial, e em área total.

Em cada aplicação foi fornecido o equivalente a 40, 60, 80, 3, 2 e 1,5 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Zn, B e Cu. Foi também adicionado Mo na dose de 20 g ha<sup>-1</sup>. As fontes dos nutrientes foram respectivamente: ureia, superfosfato triplo, cloreto de potássio, sulfato de zinco, ulexita e sulfato de cobre e molibdato de sódio. O calcário dolomítico foi aplicado na dose de 1,3 Mg ha<sup>-1</sup>, com 28.9% de CaO e 19.9% de MgO, e PRNT de 89.4%.

Cada parcela continha 16 árvores (centrais, disposta no esquema 4 x 4 linhas e plantas) e uma bordadura representada por duas linhas de plantas ou duas plantas. Após a demarcação das árvores, as plantas de *Pinus* tiveram os galhos serrados manualmente a altura de 2m.

Em novembro de 2015 foi realizado o corte raso do experimento. Antes do corte foi medido o DAP de todas as árvores úteis (Até 16 arvores por parcela). As três árvores dominantes de cada parcela foram cubadas.

Utilizou-se como critério de dominância o valor do DAP, excluindo da seleção árvores favorecidas pela mortalidade natural de plantas adjacentes, arvores bifurcadas ou que apresentavam tortuosidade. A cubagem dessas árvores foi realizada medindo-se o comprimento do fuste e as circunferências da tora nas alturas de 0, 25, 50, 75 e 100% do tamanho total do fuste.

Todas as circunferências (cAP, e as quatro posições no fuste - 0, 25, 50, 75 e 100%) foram mensuradas com fita métrica. O volume foi calculado considerando que cada um dos segmentos da tora (determinados pelas medições da circunferência) é um semicone perfeito, sendo obtido o volume comercial individual (VCi).

Foi plotada uma correlação linear entre o DAP e o VCI medido para as arvores dominantes. A equação gerada, que converte DAP em VCI, foi utilizada para calcular o volume de todas as árvores da parcela. O VC (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) foi obtido pelo produto do número teórico de plantas por hectare (1666 arvores ha<sup>-1</sup>) com a relação entre o somatório dos VCI de cada parcela pelo respectivo número de fustes úteis.

As árvores de cada parcela foram classificadas em três classes de DAP (11 a 18 cm, 18 a 23 cm e 23 a 35 cm). O somatório do CVi das árvores de cada classe foi calculado pelo somatório do CVi de cada indivíduo dentro da respectiva classe.

O DAP (cm) foi determinado pela média dos DAP's medidos, o DAP<sup>d</sup> pela média dos DAP's das árvores denominadas dominantes. O CV<sup>d</sup> foi calculado idem ao CV, todavia considerando apenas as árvores dominantes.

Amostras de serapilheira foram coletadas em cada parcela composta de quatro sub amostras, coletada em cada quadrante da mesma, de modo aleatório, evitando área perturbada por animais (formigueiros, cupinzeiros, ou de buracos feitos por animais). A amostragem foi realizada com auxílio de um gabarito de 10 x 10 cm, que foi colocado na superfície da serapilheira e o material vegetal foi cortado com uma lâmina até atingir o solo. Retirou-se a serapilheira das laterais, para permitir a retirada da serapilheira indeformada.

A serapilheira indeformada foi então armazenada em cartuchos de papel, e posteriormente levada ao laboratório. No laboratório, foram separadas em Ln (acícula que não quebrava ao tentar se fazer um laço, senescida recentemente), Lv (acículas quebradiças), Lf (horizonte orgânico onde os resíduos orgânicos encontram-se fragmentados e parcialmente decompostos, com presença de raízes) e Lh (horizonte orgânico onde não se reconhece mais o tecido que deu origem ao material, com presença de raízes). As sub amostras de cada horizonte foram então unidas para formar uma amostra composta por parcela.

Para as amostras de Lf e Lh foi retirada uma sub amostra, com cerca de 10% da amostra total, em que as raízes foram separadas por catação. Assim, para os horizontes Lf e Lh tem se então amostras de serapilheira completa (com raízes), serapilheira sem raízes e raízes.

Das amostras de raízes desses horizontes foi obtida ainda uma sub amostra de aproximadamente 0,5 g de matéria fresca (MF). Essas raízes foram então digitalizadas em 300 d.p.i. em scanner, as imagens foram submetidas ao software Safira (Jorge e Rodrigues, 2008), que foi utilizado para determinar o Comprimento total de raízes na amostra (mm amostra<sup>-1</sup>). Desta forma, os horizontes Lf e Lh possuem amostra de raízes e de raízes que foram utilizadas para determinação do comprimento radicular – Safira.

Todas as amostras (Ln, Lv, Lf com raízes, Lf sem raízes, raízes do Lf, raízes do Lf utilizadas para o SAFIRA, Lh com raízes, Lh sem raízes, raízes do Lh, raízes do Lh utilizadas para o SAFIRA) foram então secas em estufa por circulação forçada de ar a 65°C, por 48h.

Em seguida foram retiradas da estufa, deixadas em ambiente por 45 minutos. As amostras de serapilheira com raízes e serapilheira foram pesadas com precisão de quatro casas decimais. Os dados de Matéria Seca (MS) e de Comprimento de raiz (gerados pelo Safira) foram utilizados para os cálculos de: Massa da serapilheira sem raízes ( $\text{Mg ha}^{-1}$  MS), Massa de raízes no Lf, Lh e serapilheira ( $\text{Mg ha}^{-1}$  MS), Conteúdo de raízes na serapilheira (em MS) para Lf, Lh e serapilheira ( $\text{kg Mg}^{-1}$  MS), Comprimento de raízes para Lf, Lh e serapilheira ( $1000 \text{ km ha}^{-1}$ ), Conteúdo de raízes na serapilheira para Lf, Lh e serapilheira ( $1000 \text{ km ha}^{-1}$ ) e Comprimento específico de raiz ( $\text{m g}^{-1}$  MS).

As variáveis obtidas foram submetidas a testes de hipóteses lineares (análise de contraste). Foi utilizado o teste de contraste sem transformação. Ao todo foram testados 14 contrastes (Tabela 2.2).

TABELA 2.2. Hipóteses lineares (contrastos) testadas em experimento de diagnose por omissão em plantios estabelecido de *P. taeda* L. em Arapoti/PR.

HL nº	Efeito Conjunto	Tratamentos contrastantes		
1	Adubação*	Fertilizados	x	Testemunha
2	Adubação	Completo	x	Testemunha
3	NPK+Micro	-Calcário	x	Testemunha
4	NPK+Calcário	-Micro	x	Testemunha
5	Micro+Calcário	-NPK	x	Testemunha
6	BMoCu+NPK+Calcário	-Zn	x	Testemunha
7	NP+Micro+Calcário	-K	x	Testemunha
8	NPK	Completo	x	-NPK
9	NP	-K	x	-NPK
10	K	Completo	x	-K
11	Micro	Completo	x	-Micro
12	BMoCu	-Zn	x	-Micro
13	Zn	Completo	x	-Zn
14	Calcário	Completo	x	-Calcário

\*Média dos tratamentos fertilizados em comparação com a testemunha.

As diferenças, em valor absoluto, entre os tratamentos contrastantes, foram apresentadas juntamente com a significância de cada contraste testado. Para cada variável, os valores médios de cada tratamento foram apresentados juntamente com seu desvio padrão.

### 3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação de NP, em plantio de *P. taeda* L. estabelecido, concomitantemente com quaisquer outro (s) conjunto (s) de nutrientes testado (s), aumentou sobremaneira o porte das plantas. Todos contrastes contendo esse conjunto de nutrientes apresentaram efeitos significativos na H<sup>d</sup> e/ou DAP's e/ou CV's (Figura 2.1, contrastes 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 e 9), representando respectivamente incremento de entre 0.8 e 2.0 m na H<sup>d</sup>, de 0,4 a 4,0 cm no DAP e de 11 a 122 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> no CV.

É possível afirmar, portanto, que o principal fator de incremento em produtividade de *P. taeda* L., no presente estudo, tenha sido o fornecimento do nutriente P. A importância primordial da adubação com P em plantios de *P. pinaster* S. cultivados em solos pobres e com alto poder de adsorção para esse nutriente foi previamente relatada (Trichet et al., 2008, 2009). Desse mesmo modo, a carência de P pode ser o primeiro fator limitante de produtividade em *P. montezumae* L. no México, caso as práticas de cultivo adotadas na região venham a mudar (Lopez-Escobar et al., 2017).

Respostas positivas também foram observadas para a adubação nitrogenada em plantio estabelecido de *P. patula* S., cultivado no norte do México. Esse estudo foi feito em solo desenvolvido de rocha ígnea extrusiva e sob clima temperado (com chuvas de verão e umidade média), e a região apresenta predominância de Andossolos (INEGI, 2009; Lázaro-Dzul et al., 2012), fatores que aumentam a possibilidade de resposta a adubação nitrogenada. Por outro lado, em clima subtropical, como o do presente estudo, a adubação nitrogenada em *P. taeda* L. tende a prejudicar a condutância hidráulica em direção aos estômatos, reduzindo o crescimento das plantas (Faustino et al., 2013, 2015).

Em condição de solo semelhante ao observado para o presente estudo, em termos de acidez e disponibilidade de nutrientes, o *P. taeda* L. apresentou acréscimos de produtividade com a aplicação de pelo menos 70 e 150 kg ha<sup>-1</sup> de N e



P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Moro et al., 2014b). Já, o *P. caribaea* M., em seu centro de origem, Cuba, também apresentou acréscimos no diâmetro em decorrência da aplicação de pelo menos 53-66-66 kg ha<sup>-1</sup> de N + P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + K<sub>2</sub>O (León-Sánchez et al., 2016).

O fornecimento de NP é o fator de incremento em produtividade, a qual é delimitada pela presença dos conjuntos Calcário e/ou Micro ou Zn nos tratamentos, seja por restrição, antagonismo ou redução do seu efeito (Figura 2.1, contrastes 2, 3, 4 e 6), e não em razão da mitigação de alguma possível carência nutricional também de Ca, Mg e/ou micronutrientes (B, Cu, Mo e Zn).

Plantios de *P. taeda* L. e de *P. elliotti* E. em seu local de ocorrência natural, sudeste dos EUA, vêm apresentando acréscimos substanciais no crescimento das plantas em decorrência da adubação com P, NP ou NPK (Samuelson et al. 2004; Sayer et al. 2004; Zhao et al. 2009; Scott and Bliss 2012; Wightman et al. 2016).

Pelos valores de CV nos tratamentos (Figura 2.1A - contrastes 1 a 7, e Figura 2.1B), a série de força de retenção no crescimento das plantas, ou seja, o uso de calcário e Zn aplicados de maneira isolada ou conjuntamente, restringiram o crescimento na seguinte ordem: Calcário+Zn>Calcário>Zn. A adubação completa resultou um acréscimo de 61 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> no CV médio, mas, na ausência de calcário, este acréscimo seria de 122 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, e na ausência de “Micro” ou Zn, seria de 78,5 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (Figura 2.1, contrastes 2, 3, 4 e 6).

A limitação ao crescimento das plantas resultante do fornecimento de calcário pode ser também vista diretamente pelos valores negativos de incremento em DAP<sup>d</sup>, CV<sup>d</sup> e CV (Figura 2.1A, contraste 14). Por outro lado, ocorreu efeito positivo do fornecimento de BMoCu no porte das arvores dominantes (Figura 2.1A, contraste 12) esse efeito não foi observado para o fornecimento de micronutrientes (B, Mo, Cu e Zn) (Figura 2.1A, contraste 11).

A aplicação de calcário sobre a serapilheira de plantio estabelecido de *P. taeda* L., sem revolvimento e na dose em que foi utilizada (570 e 330 kg ha<sup>-1</sup> de Ca e Mg), se caracterizou como fator de estresse (Figura 2.1).

Os baixos valores de Ca e Mg disponível no solo, indicam uma possível carência de Ca e/ou Mg no presente estudo. Todavia, na forma como a dose de corretivo utilizada foi aplicada, esta se tornou um fator de estresse ao invés de sanar possíveis, ou prováveis, carências nutricionais pré-existent.

Em termos de resposta à calagem em *P. taeda* L., no estudo de Pértille et al. (2012) não foi observado melhor crescimento das plantas com a aplicação de

corretivo resíduo celulósico alcalino, realizada com propósito de elevar o pH SMP para 5,5 e fornecer Ca e Mg. Esse estudo foi desenvolvido em solo desenvolvido sobre derrame de basalto e as condições de acidez e disponibilidade de nutrientes não eram extremas como a do presente estudo (pH=4,7; Ca+Mg = 3,3 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>; P extraído = 2,4 mg kg<sup>-1</sup>).

Por outro lado, a calagem superficial de plantios estabelecidos de pinheiros cultivados na Finlândia e Suécia, resultou em redução do crescimento das plantas nos primeiros 10 anos para os sítios menos produtivos, resultado oposto foi observado para os sítios de alta produtividade (Staaf et al., 1996). Esses resultados podem estar relacionados ao efeito da calagem no aumento da taxa de mortalidade de raízes colonizadas por micorrizas (Lehto, 1994).

Carências de Mg em plantios estabelecidos de *P. radiata* D. possuem distribuição generalizada na Nova Zelândia. Essas carências ficam limitadas a solos oriundos de rochas vesiculares compostas basicamente por vidro vulcânico, material pobre em Mg (Sun e Payn, 1999). Em condições mais semelhantes ao desse estudo, um Latossolo na região do Cerrado, foi observado que a distribuição espacial da produtividade de *P. caribaea* M. foi majoritariamente explicada pelo pH da camada de 0.1-0.2m do solo (Barbosa et al., 2012). Como espécies arbóreas lenhosas, especialmente plantas do gênero *Pinus*, são pouco sensíveis à acidez do solo ou mesmo à altos níveis de Al tóxico (Pértile et al., 2012; Brunner e Sperisen, 2013), possivelmente a variação espacial da produtividade de *P. caribaea* M. observada por Barbosa et al. (2012) esteja melhor relacionada à variação nos níveis de Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup> no solo.

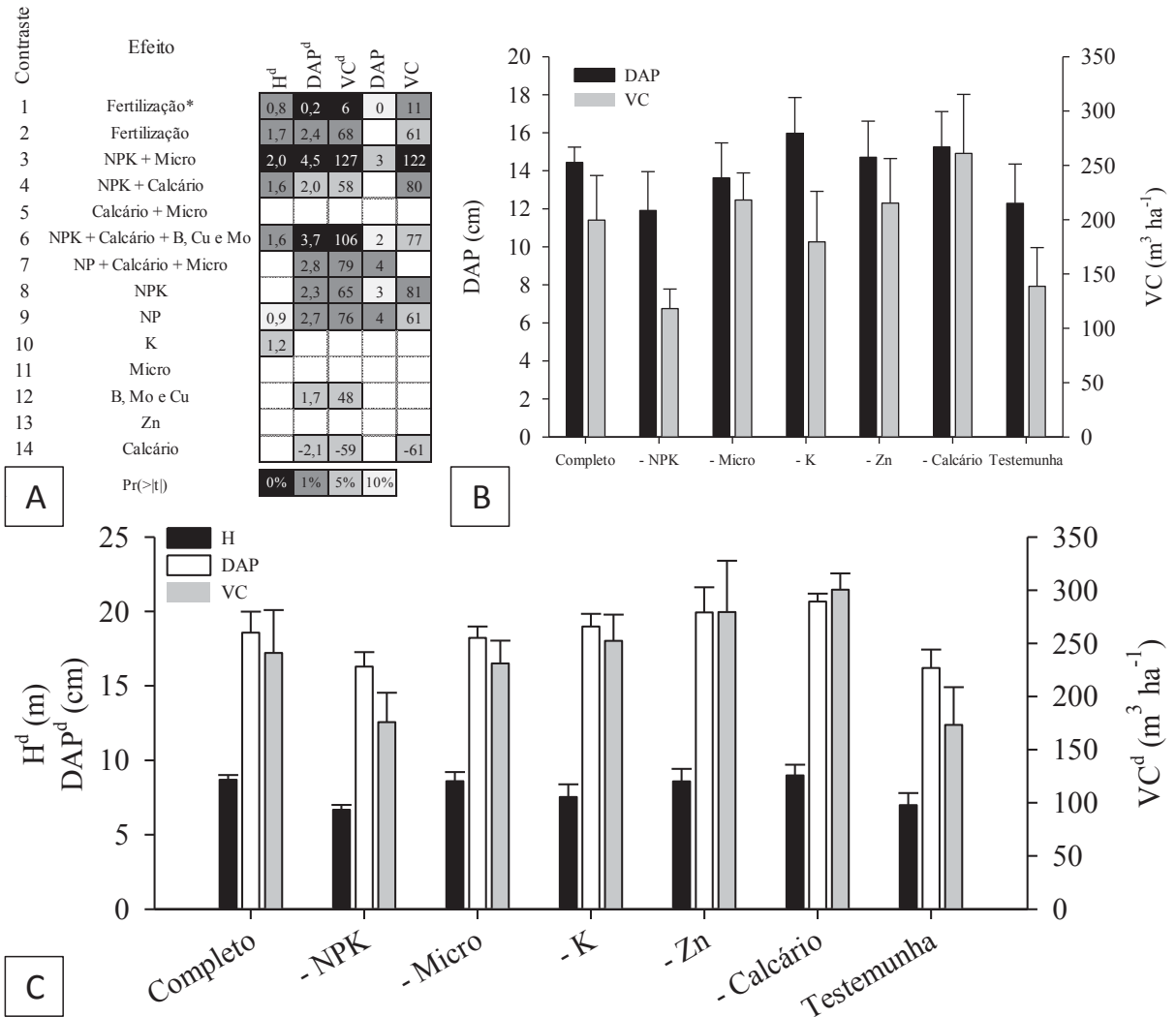
O pH do solo estudado por Barbosa et al. (2012) era de 4,3 unidades, no presente estudo o pH foi de 4,0 unidades e o Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup> = 0,2 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>. Apesar da capacidade elevada de aquisição de nutrientes pelas plantas de *Pinus* (Alves et al., 2013; Rodríguez-Robles et al., 2017), em condições extremas em termos de disponibilidade de bases é provável que a aplicação de corretivos tenha potencial para incremento em produtividade considerando um período maior de 10 anos. Ou ainda, é possível que a calagem aplicada via solo em doses adequadas, antes da implantação do plantio, não exerça efeito negativo, visto que este estaria relacionado com o contato do corretivo com a serapilheira acumulada e colonizada por uma grande quantidade de raízes.

Por outro lado, as doses de Ca e Mg utilizadas no presente estudo também ultrapassam as utilizadas em outras pesquisas. No experimento de longa duração, sobre fertilização em *P. taeda* L. de Albaugh et al. (2008) a maior dose de Ca e Mg aplicada de uma só vez foi de 134 e 56 kg ha<sup>-1</sup>. Para se realizar o experimento com NPK em *P. patula* S. no norte do México, foi feita adubação prévia de Ca e Mg nas doses de 8,2 e 2,7 kg ha<sup>-1</sup> (Lázaro-Dzul et al., 2012).

Em resumo, possivelmente não ocorrerá melhora no crescimento das plantas do gênero *Pinus* em decorrência da aplicação de corretivos da acidez (fontes de Ca e Mg) sobre a serapilheira de plantios estabelecidos se o solo contiver quantidades mínimas desses nutrientes. Ainda há um potencial efeito prejudicial de dose alta de calcário aplicada sobre a serapilheira de plantios de *Pinus* estabelecidos. Portanto, para essa modalidade de fertilização é recomendável que a aplicação de corretivos fique limitada a reposição de Ca e Mg exportados por desbastes e colheitas.

A aplicação de apenas micronutrientes concomitantemente com calcário (Ambos fatores de estresse) não apresentou efeito deletério no porte das plantas (Figura 2.1A, contraste 5, Figura 2.1B e 2.1C). O efeito negativo proporcionado por esses conjuntos de nutrientes (Micro e Calcário) é a redução do incremento que seria proporcionado pelos demais tratamentos de fertilização. Nota-se pela semelhança no porte das árvores dos tratamentos –NPK (Contém calcário e micronutrientes) e Testemunha, que apresentaram valores muito semelhantes para todas as variáveis amostradas, 6,83 ± 0,15 m de H<sup>d</sup>, 16,25 ± 0,05 cm no DBH<sup>d</sup>, 175 ± 1,5 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> no CV<sup>d</sup>, 12,1 ± 0,2 cm no DBH e 128 ± 10 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> no CV.

Figura 2.1. Experimento de adubação com omissão de nutrientes em *P. taeda* L., realizado no polo florestal de Jaguariaíva/PR. As árvores foram adubadas com 05 anos e as avaliações foram feitas aos 12. Resultados das hipóteses lineares testadas<sup>LH</sup> (Figura 2.1A) para a altura de fuste (H), diâmetro a altura do peito (DBH<sub>d</sub>) e volume comercial (CV<sub>d</sub>) calculados considerando apenas as árvores dominantes (Figura 2.1B), diâmetro a altura do peito (DBH) e volume comercial (CV) médios (Figura 2.1C). Os valores em cada célula em "A" representam a diferença entre os tratamentos contrastados pela hipótese linear, sempre subtraindo o valor do tratamento menos fertilizado do mais fertilizado. Os tratamentos ou grupo de tratamentos comparados em cada contraste pode ser visualizado na tabela 2.2. Pr(>|t|) é referente ao teste de contraste sem transformação. Altura média do fuste<sup>H</sup>; Diâmetro a altura do peito<sup>DBH</sup>; Volume comercial<sup>CV</sup>. As barras de erro em "B" e "C" equivalem ao desvio padrão amostral. Hipótese linear<sup>LH</sup>.



Os conjuntos de nutrientes que apresentaram efeitos significativos para CV (contrastes 2, 3, 4, 6, 8 e 9, Figura 2.1A) também resultaram em acréscimo no volume por classe de diâmetro (Figura 2.2A).

O tratamento –Calcário (contraste 3) resultou em acréscimo de volume nas classes 18-23 e 23-35 cm de DAP, enquanto para o tratamento –Micro (contraste 4) o acréscimo no volume deu-se na classe mais nobre (23-35 cm de DAP). Os demais

contrastes (2, 6, 8 e 9) apresentaram efeito de acréscimo de volume na classe intermediária (18-23 cm de DAP) apenas (Figura 2.2A).

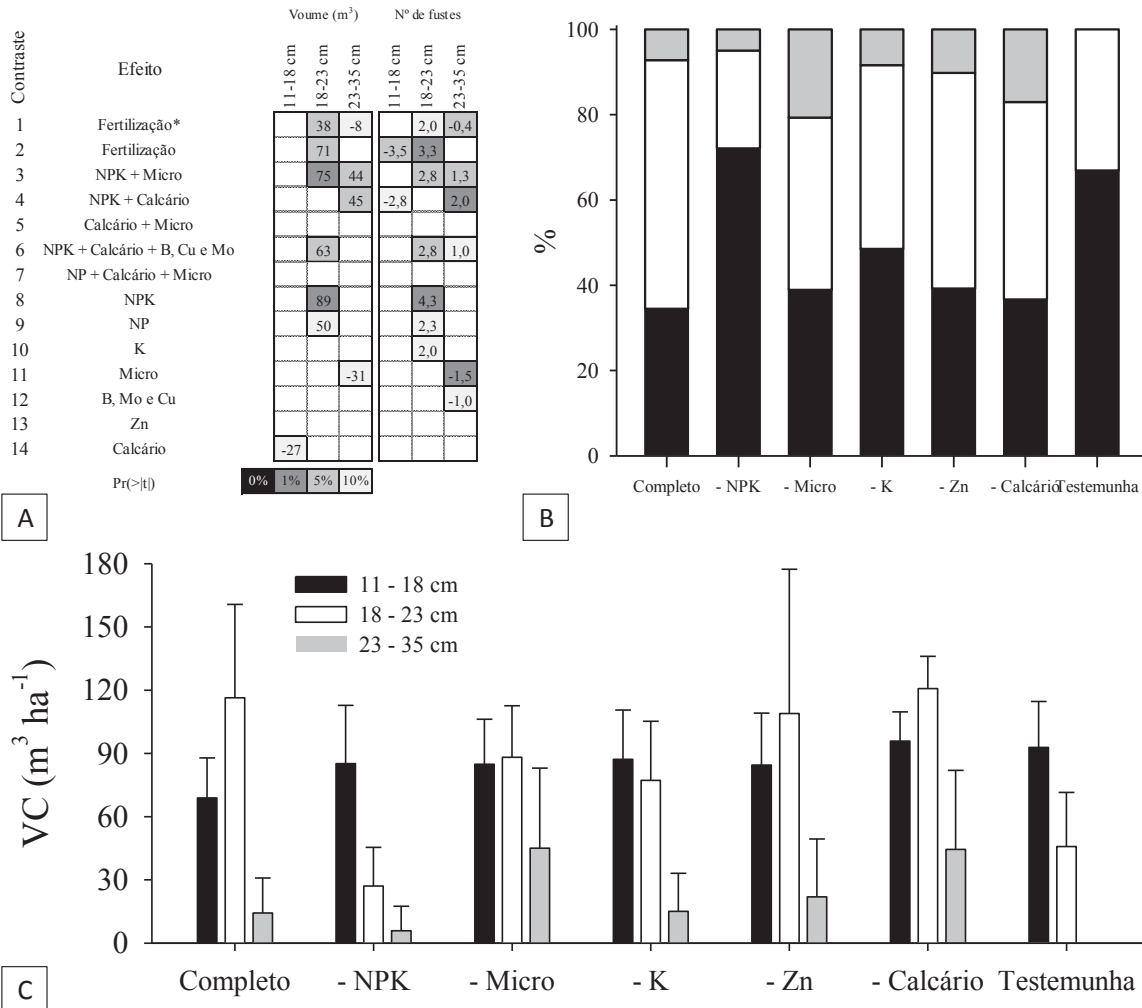
O aumento da contribuição no volume total de madeira de classes mais nobres (18-25 e 25-35 cm de DAP) vem sendo utilizada no estabelecimento de qualidade do sítio para *P. taeda* L. (David et al., 2017), como reflexo no crescimento. O aumento do nº de toras e/ou do CV na classe mais nobre de DAP (23-35 cm de DAP) promovido pelos tratamentos –Calcário, -Micro e –Zn talvez seja o principal indicativo do presente estudo da importância da composição nutricional adequada da fertilização de *Pinus* para a produção de madeira. Toras de *Pinus spp.* que se enquadram na classe 15-25 cm de DAP, apresentaram em média 26% de rendimento na serraria, para a classe 26-35 cm de DAP o rendimento aumentou para 41% (Barrios et al., 2016). Os autores relatam que foi necessário, em média, 58 toras da classe 15-25 cm de DAP para se fabricar 1000 pés de mesa, para a classe 26-35 cm de DAP foram requeridas apenas 23.

O tratamento com micronutrientes reduziu, em comparação com a aplicação de apenas NPK+Calcário, o volume de madeira na classe mais nobre de madeira para serraria, 23-35 cm de DBH (Figura 2.2, contraste 11). Redução semelhante foi observada na menor classe de diâmetro de tora (11-18 cm de DAP) como resultado da adição de calcário ao tratamento (Figura 2.2A, contraste 14).

Como supracitado, a aplicação de Zn na dose de 6 kg ha<sup>-1</sup> também se caracterizou como um fator de estresse. Todavia, resultou em efeitos limitantes de menor magnitude do que os observados para o calcário (Figura 2.1 e 2.2, contrastes 11 a 14).

O teor médio de 33.04 mg kg<sup>-1</sup> MS de Zn foi observado na serapilheira de plantio de *P. taeda* L. estabelecido em solo oriundo de basalto, com idade entre 5 a 7 anos (Schumacher et al., 2008a). Extrapolando essa concentração de Zn para a maior quantidade de serapilheira observada no presente estudo (Coletas realizada em plantio com 12 anos) percebe-se que a dose de Zn aplicada (Na forma de sulfato de Zn) ainda seria equivalente à pelo menos quatro vezes o total de Zn contido na serapilheira. A dose aplicada é o equivalente ao que seria exportado pela retirada de mais de 820 Mg ha<sup>-1</sup> de lenho com casca de *P. taeda* L. (Londero et al., 2011).

Figura 2.2. Experimento de adubação com omissão de nutrientes em *P. taeda* L., realizado em Arapoti/PR. As árvores foram adubadas com 05 anos e as avaliações foram feitas aos 12. Resultado das hipóteses lineares testadas para o volume de madeira e o número de fustes em cada classe de DBH (A), volume de madeira por classe de DBH (B) e porcentagem do volume comercial total em cada classe (C). Em "A" o DBH é dado em cm, e o  $Pr(>|t|)$  é referente ao teste de contraste sem transformação. A legenda em "B" é válida para "B" e "C". As barras de erro em "C" equivalem ao desvio padrão amostral. Volume comercial<sup>CV</sup>; Hipótese linear<sup>LH</sup>.



O uso de fertilizantes e calcário resultaram em aumento no acúmulo de *litter* no horizonte Lv, provavelmente relativo ao verão, outono e inverno, mesmo após sete anos da fertilização (Figura 2.3, contrastes de 1 a 7). Os tratamentos fertilizados apresentaram em média 6,1 Mg ha<sup>-1</sup> e o tratamento Testemunha 3,7 Mg ha<sup>-1</sup> MS no Lv (Figura 2.3B). Foram observados acréscimos entre 1,5 e 3,3 Mg ha<sup>-1</sup> MS no Lv (Figura 2.3A, contrastes de 1 a 7).

Entre os 5 e 7 anos de idade, o *P. taeda* L. apresenta deposição média de 4,52 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> MS (Schumacher et al., 2008a). Aos 8 anos de idade esse valor pode ser de 7,1 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> MS (Piovesan et al., 2012). Ambos os estudos foram

desenvolvidos também sob clima subtropical no Sul brasileiro, todavia em solos oriundos de material rico, basalto. Com valores de deposição dessa magnitude nota-se que o período médio de permanência do material no horizonte Lv seria curto, algo entre 1 e 1,5 ano, indicando que o fator para incremento possivelmente continue atuando.

Dentre os tratamentos fertilizados, a omissão de Zn resultou em maior acréscimo na biomassa do horizonte Lv (Figura 2.3A, contraste 6). Os acréscimos de biomassa nesse horizonte foram condizentes com os acréscimos em CV proporcionado pelos tratamentos (Figura 2.1A), indicando que, de forma geral, o acúmulo de serapilheira está relacionado com o crescimento das plantas.

Com relação ao efeito da ausência de Zn no acúmulo de serapilheira no horizonte Lv, é possível que o Zn dos demais tratamentos tenha potencializado o efeito da enzima Manganês-peroxidase (Praveen et al., 2012; Ufot et al., 2016). Teoricamente, é a primeira proteína ativada na rota de catabolismo fúngico da lignina (Janusza et al., 2013; Manavalan et al., 2015). Assim ter-se-ia observado aqui interação entre a deposição e a digestibilidade microbiológica do material, dessa vez afetada pela disponibilidade de Zn.

O período entre a aplicação e a avaliação (sete anos) foi suficiente para que houvesse aumento do acúmulo até no horizonte mais humificado – Lh. Os contrastes 1, 6 e 7 (Fertilização\*, -Zn e -K) apresentaram efeitos significativos para Lh (Figura 2.3A), que revelam acréscimo de 11, 14 e 15 Mg ha<sup>-1</sup> MS no Lh. Quando da omissão de K a quantidade de serapilheira total foi de 52,5 Mg ha<sup>-1</sup> MS, comparado com 25 Mg ha<sup>-1</sup> MS observado na testemunha e de 40 Mg ha<sup>-1</sup> DM de serapilheira nos demais tratamentos fertilizados.

Senescência precoce de acículas foi apontada como uma adaptação à carência de K para plantas de *P. pinaster*, com conseqüente aumento de deposição de material (Eimil-Fraga et al., 2015), o que no presente estudo resultou em maior acúmulo de serapilheira no tratamento –K.

Assim, o efeito da fertilização sobre o acúmulo de serapilheira em *P. taeda* L. seria predominantemente relacionado ao aumento da deposição de material. Todavia, em segundo plano certamente há variações de menor magnitude na taxa de acúmulo do material depositado (conversão em compostos orgânicos estáveis) em função da sua composição química (Teores nutricionais, conteúdo de compostos fenólicos e terpenos por exemplo) e também do enriquecimento direto do material



pela solubilização dos fertilizantes (Kanerva et al., 2008; Kaspari et al., 2008; Mateiré et al., 2016; Ferrenberg et al., 2017; Lin et al., 2017).

Todavia, o aumento do acúmulo de serapilheira em razão da fertilização aqui observado não é regra. O sentido da relação pode depender de fatores como tempo após aplicação, clima e até mesmo a composição nutricional da fertilização. Após 20 anos da aplicação de NPK+Ca (200, 115, 150 e 600 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O e Ca), o serapilheira acumulado de *P. sylvestris* no norte da Áustria (Clima temperado) foi de 24 Mg ha<sup>-1</sup> MS, quando fertilizado, e de 76 Mg ha<sup>-1</sup> DM caso contrário (Jandl et al., 2003).

A omissão do K também exerceu efeito marcante na biomassa de raízes (Figura 2.3C e 2.3D). O tratamento -K foi superior ao tratamento completo e testemunha em 3.2 e 3.7 Mg ha<sup>-1</sup> MS (Figura 2.3C, contrastes 7 e 10). Em termos de valores absolutos, a biomassa de raízes observada no tratamento -K, em ambos horizontes (Lf e Lh), é próximo do dobro da média dos demais tratamentos (Figura 2.3D). Os tratamentos Completo, -K e a Testemunha apresentaram em média 5, 9 e 4.25 Mg ha<sup>-1</sup> MS de raízes na serapilheira.

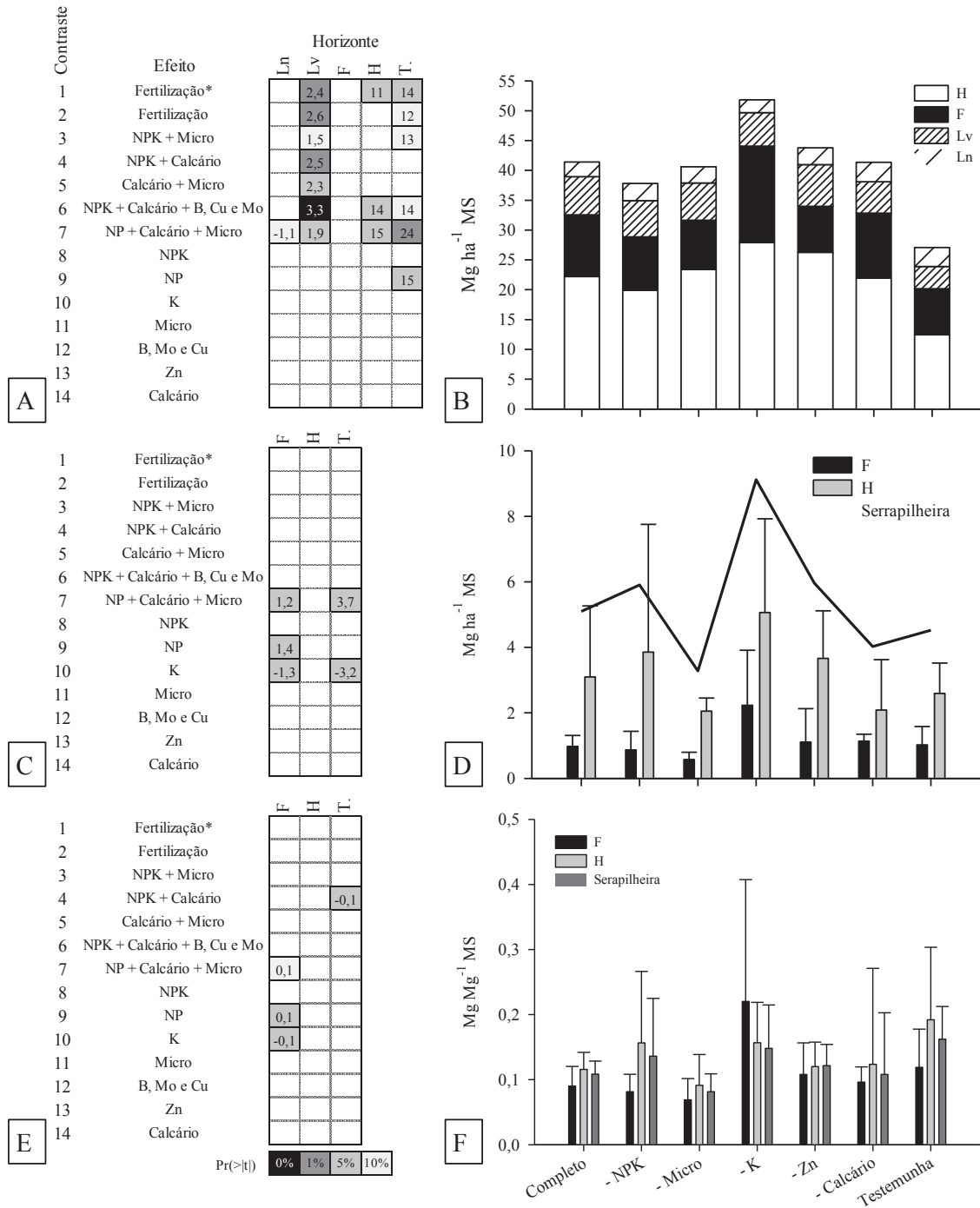
Com exceção do tratamento -K, os demais apresentaram valores de biomassa de raízes semelhante ao observado para um plantio estabelecido de *P. sylvestris* cultivado no sudeste da Finlândia, apesar do DAP médio de 19 cm esse plantio tinha 78 anos (Vanninen e Makela, 1999).

A quantidade relativa de massa de raízes por massa de serapilheira, mostradas nas Figuras 2.3E e 2.3F, confirma a influência do K. Em relação aos tratamentos -NPK e Testemunha, na ausência de K o conteúdo de raízes no Lf foram superiores em aproximadamente 140 e 100 unidades (kg Mg<sup>-1</sup> MS). Ao mesmo tempo, a adição de K no tratamento resultaria em 130 unidades a menos (Figura 2.3E, contrastes 7, 9 e 10). Para essa variável a aplicação conjunta de NPK+Calcário resultou em redução de 44 kg Mg<sup>-1</sup> MS de raízes na serapilheira (Figura 2.3E, contraste 4).

Em contraste, acréscimo considerável na exploração do solo pelas raízes finas em decorrência do fornecimento de 200 kg ha<sup>-1</sup> K em floresta de *Picea abies* com 55 anos de idade, no sudeste da Áustria, avaliada aos 63 anos. Nesse experimento, embora não estatisticamente significativo, o horizonte superficial da serapilheira (Oi+Oe, composto basicamente por detritos mal decompostos,

equivalente ao Lf) apresentou 21% menos comprimento de raiz quando fertilizado com K (Wang et al., 2016).

Figura 2.3. Experimento de adubação com omissão de nutrientes em *P. taeda* L., realizado em Arapoti/PR. As diferenças entre os tratamentos foram realizadas através de hipóteses lineares testadas LH. Diferenças entre os tratamentos para Massa da matéria seca do serapilheira (A) Massa da matéria seca de cada horizonte orgânico que compunha o serapilheira (B). Diferenças entre os tratamentos para Biomassa de raízes (C), Biomassa de raízes na serapilheira (D). Diferenças entre os tratamentos para Conteúdo de raiz no serapilheira (E) Conteúdo de raiz no serapilheira (F). Micro = B, Cu, Mo e Zn. Complet = NPK+Calcário+Micro.



Os resultados sobre comprimento de raízes apresentados (Figura 2.4), confirmam o efeito da omissão de K sobre o comprimento de raízes, com incremento de  $66 \times 10^3$  e  $146 \times 10^3$  km ha<sup>-1</sup> apenas no horizonte Lf e na serapilheira total, em comparação com a testemunha (Figura 2.4A e B, contraste 7). Em comparação com o tratamento – NPK esses valores foram  $71 \times 10^3$  e  $134 \times 10^3$  km ha<sup>-1</sup> de raízes (Figura 2.4A e B, contraste 9).

Os valores aqui observados são muito altos se comparados com  $16 \times 10^3$  km ha<sup>-1</sup> de raízes no serapilheira observado em um plantio estabelecido de *P. taeda* L. com 15 anos de idade, crescendo em solo desenvolvido de basalto (Lopes et al., 2010b).. Nesse sentido C. Javier et al. (2005) pontuam que sítios de baixo crescimento tendem a apresentar os maiores valores da relação Raiz/Tronco. Assim sendo, se constataria uma tremenda plasticidade das plantas de *P. taeda* L. na alocação de C (parte aérea e raiz) em razão da composição nutricional do meio.

Para o horizonte Lf, os incrementos estão majoritariamente relacionados com aumento no LRL (*Length Roots Litter*) - Comprimento de raízes por massa de serapilheira (kg Mg<sup>-1</sup> MS) (Figura 2.4A, contrastes 7 e 9). Nesse aspecto, também foi observado que a aplicação do tratamento Completo e NPK+Calcário (-Micro) reduziu o LRL em  $1.8 \times 10^3$  e  $2.4 \times 10^3$  unidades (km Mg<sup>-1</sup> DM).

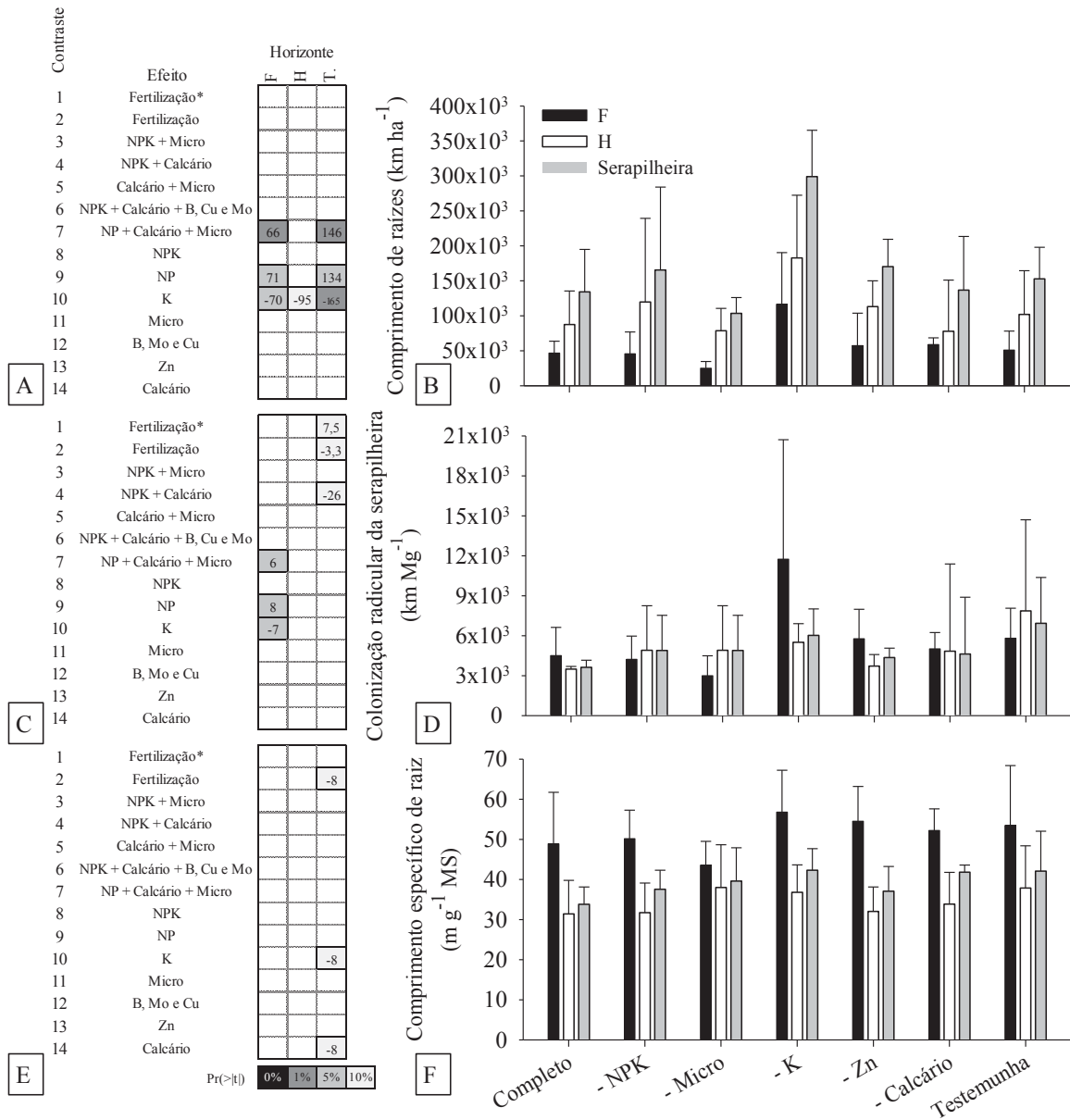
Interessante notar nesse ponto que a ausência de K apresentou seu efeito marcante apenas quando da presença de NP. Conforme supracitado, a omissão de macronutrientes apresentou valores muito semelhantes à testemunha nas variáveis de produtividade e distribuição de raízes (Figuras 2.1 e 2.2). E, em termos de distribuição de raízes, o efeito mais pronunciado foi o acréscimo de raízes no horizonte mais superficial do serapilheira.

Praticamente não houve efeito da fertilização no comprimento específico das raízes (*CER*). Os efeitos de Fertilização, K e Calcário reduziram o SRL na serapilheira em  $8 \text{ m g}^{-1}$  MS (Figura 2.4C, contrastes 2, 10 e 14, Figura 2.4D).

Efeito oposto foi observado para *P. pinaster* S. cultivado em planície costeira a 20 km ao sul de Bordeaux/França, adubado a partir dos 6 e avaliado aos 13 anos. A SRL foi em média de 18 no tratamento Testemunha contra  $34 \text{ m g}^{-1}$  DM no tratamento fertilizado com NPK+Ca e Mg (Bakker et al., 2009). A fertilização e o estresse por Al (Caracterizado pela relação Ca/Al da solução) reduzem o SRL em 13 e 20% para espécies arbóreo-lenhosas ao longo da Europa (Ostonen et al., 2007).

Com base no exposto, percebe-se que a SRL de coníferas apresenta alguma plasticidade junto à composição nutricional do substrato. Por outro lado, não houve diferença entre sítios de qualidade contrastantes na classificação diamétrica das raízes de *P. radiata* cultivado na região central do Chile (C. Javier et al., 2005).

Figura 2.4. Experimento de adubação com omissão de nutrientes em *P. taeda* L., realizado no polo florestal de Jaguariáiva/PR. Diferenças entre os tratamentos para Comprimento de raízes (A) Comprimento de raízes na serapilheira (B) Diferenças entre os tratamentos para Colonização radicular da serapilheira (C) Colonização radicular da serapilheira (D) Diferenças entre os tratamentos para Comprimento específico de raiz (E) Comprimento específico de raiz (F).



Ainda, na interpretação dos resultados deve se considerar que as raízes de pinus podem alcançar grandes distâncias da base da árvore, aproximadamente três a quatro vezes a altura da planta (Sudmeyer et al., 2004). Nesse caso, mesmo com nossas unidades experimentais de 12.000 m<sup>2</sup>, as populações das parcelas formariam uma sobreposição de seus sistemas radiculares superior a malha dos tratamentos. Cada parcela pode conter de três a oito parcelas adjacentes. Não obstante, fungos micorrízicos conectam as plantas pelas raízes através de uma rede de hifas, e essa rede de raízes de plantas distintas conectadas por fungos (Network ou *wood wild web*) permite o movimento de recursos nutricionais entre plantas coexistentes (Selosse et al., 2006; Heijden et al., 2015; Song et al., 2015).

Ao mesmo tempo as árvores das parcelas fertilizadas teriam, ao princípio, favorecimento na aquisição dos nutrientes aplicados, em relação as parcelas adjacentes ou até as árvores da bordadura. Plantas de *P. taeda* L. apresentam uma ciclagem interna de nutrientes extremamente eficiente (Schumacher et al. 2008; Viera and Schumacher 2009). A eficiência na ciclagem interna de nutrientes prolongaria o efeito dos nutrientes adquiridos pela planta.

### 3.6 CONCLUSÕES

A maior limitação ao crescimento das plantas de *P. taeda* L. em Arapoti/PR é a carência de P, a dose de 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicada sobre a serapilheira de plantio estabelecido está associada com aumentos substanciais de produtividade, sem efeitos deletérios.

A dose de 2.6 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário provoca séria limitação ao crescimento das plantas, possivelmente seja um resultado do conjunto dose (alta) e tempo de aplicação (curto, menor que 10 anos, segundo Staaf et al. (1996)).

O solo é extremamente pobre em K, todavia, não foi possível verificar resposta para a adição desse nutriente no presente experimento, visto que como todos os demais nutrientes foram supridos (N, P, Ca, Mg, B, Zn, Cu, Mo), a carência relativa de K foi sanada por adaptações na ciclagem de acículas e dimensão do sistema radicular, possivelmente envolvendo distribuição do K aplicado.

Carência do micronutriente Zn pode ser verificada apenas pelo aumento na taxa de decomposição da serapilheira depositada. Todavia, a dose aplicada de Zn (8 kg ha<sup>-1</sup> de Zn) também exerce efeito deletério na produtividade.

A fertilização com B, Cu e Mo em conjunto tem potencial para aumentar o crescimento das árvores de maior porte em plantio de *P. taeda* L. em Arapoti/PR.

## 3.7 REFERÊNCIAS

- ALBAUGH, T. J., ALLEN, H. L., FOX, T. R. Nutrient use and uptake in *Pinus taeda*. **Tree Physiology**. v.28. p.1083–1098. 2008.
- ALBAUGH, T. J., ALLEN, H. L., ZUTTER, B.R., QUICKE, H. E. Vegetation control and fertilization in midrotation *Pinus taeda* stands in the southeastern United States. **Annals of Forest Science**. v.60. p.619–624. 2003.
- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., DE MORAES, GONÇALVES, J. L., SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**.v. 22. p.711–728. 2013.
- ALVES, M. J. F., MELO, V. DE F., REISSMANN, C. B., KASEKER, J. F. Reserva mineral de potássio em latossolo cultivado com *Pinus taeda* L. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**.v. 37. p.1599–1610. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. **Anuário Estatístico ABRAF 2013: Ano Base 2012**. Brasília; 2013.
- BAKKER, M. R., JOLICOEUR, E., TRICHET, P., AUGUSTO, L., PLASSARD, C., GUINBERTEAU, J., LOUSTAU, D. Adaptation of fine roots to annual fertilization and irrigation in a 13-year-old *Pinus pinaster* stand. **Tree Physiology**. v. 29. p. 229–238. 2009.
- BARBOSA, C. E. M., FERRARI, S., CARVALHO, M. DE P. E., PICOLI, P. R. F., CAVALLINI, M. C., BENETT, C. G. S., SANTOS, D. M. A. DOS. Inter-Relação da Produtividade de Madeira do *Pinus* com Atributos Físico-Químicos de um Latossolo do Cerrado. **Revista Árvore**. v. 36. p. 25–35. 2012.
- BARRIOS, R. O., MARTÍNEZ, S. D., RABANALES, D. E. V., JUÁREZ, W. S. Determinación del coeficiente y calidad de aserrío del género *Pinus* en la región Sierra Sur, Oaxaca, México. **Colombia Forestal**. v.19. p.79–93. 2016.
- BATISTA, A. H., MOTTA, A. C. V. , REISSMANN, C. B., *et al* () Liming and fertilisation in *Pinus taeda* plantations with severe nutrient deficiency in savanna soils. **Acta Scientiarum. Agronomy**. v. 37 p.117–125. 2015. DOI: 10.4025/actasciagron.v37i1.18061
- BRUNNER, I., SPERISEN, C. Aluminum exclusion and aluminum tolerance in woody plants. **Frontiers in Plant Science**. v.4. p.1–12. 2013. DOI: 10.3389/fpls.2013.00172
- CHAVES, R. DE Q., CORRÊA, G. F. Micronutrients in the soil - *Pinus caribaea* Morelet system with yellowing of the needles followed by senescence and death. **Revista Árvore**. v. 27. p. 769–778. 2003.
- CHERNOBROVKINA, N. P., ROBONEN, E. V., UNZHAKOV, A. R., TYUTYUNNIK, N. N. Arginine in the life of coniferous plants. **Contemporary Problems of Ecology**. v. 9. p. 600–607. 2016.



- DAVID, H. C., NETTO, S. P., ARCE, J. E., CORTE, A. P. D., FILHO, A. M., DE ARAÚJO, E, J. G. Efeito da qualidade do sítio e do desbaste na produção de pinus. **Floresta e Ambiente**. v.24. 2017.
- EIMIL-FRAGA, C., SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, F., ÁLVAREZ-RODRÍGUEZ, E., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. Variability in needle lifespan and foliar biomass along a gradient of soil fertility in maritime pine plantations on acid soils rich in organic matter. **Forest Ecology and Management**. v. 343. p.34–41. 2015.
- FAUSTINO, L. I., BULFE, N. M. L., PINAZO, M. A., MONTEOLIVA, S. E., GRACIANO, C. Dry weight partitioning and hydraulic traits in young *Pinus taeda* trees fertilized with nitrogen and phosphorus in a subtropical area. **Tree Physiology**. v. 33. p. 241–251. 2013.
- FAUSTINO, L. I., MORETTI, A. P., GRACIANO, C. Fertilization with urea, ammonium and nitrate produce different effects on growth, hydraulic traits and drought tolerance in *Pinus taeda* seedlings. **Tree Physiology**. v. 35. p. 1062–1074. 2015.
- FERRENBURG, S., LANGENHAN, J. M., LOSKOT, S. A., ROZAL, L. M., MITTON, J. B. Resin monoterpene defenses decline within three widespread species of pine (*pinus*) along a 1530-m elevational gradient. **Ecosphere**. v.8. 2017.
- GUERRA, J., GAYOSO, J., SCHLATTER, J., & NESPOLO, R. Análisis de la biomasa de raíces en diferentes tipos de bosques: Avances en la evaluación de *Pinus radiata* en Chile. **Bosque (Valdivia)**, v. 26. p. 5-21. 2005.
- HEIJDEN, M. G. A. VAN DER, MARTIN, F. M., SANDERS, I. R. Tansley review Mycorrhizal ecology and evolution : the past, the present, and the future. **New Phytologist**. v. 205. p. 1406 –1423. 2015.
- HELMISAARI, H. S., DEROME, J., NOJD, P., KUKKOLA, M. Fine root biomass in relation to site and stand characteristics in Norway spruce and Scots pine stands. **Tree Physiology**. v. 27. p.1493–1504. 2007. DOI: 10.1093/treephys/27.10.1493.
- INEGI. **Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos** [Internet]. Aquixtla: Aquixtla, Puebla. p. 9. 2009.
- JANDL, R., KOPESZKI, H., BRUCKNER, A., HAGER, H. Forest soil chemistry and mesofauna 20 years after an amelioration fertilization. **Restoration Ecology**. v.11. p. 239–246. 2003.
- JANUSZA, G., PAWLIKA, K., MAGDALENA, S. A. P. J. Fungal laccase, manganese peroxidase and lignin peroxidase: Gene expression and regulation. **Enzyme and Microbial Technology**. v. 52. p. 1–12. 2013.
- JORGE, L. A. DE C., RODRIGUES, A. F. DE O. Safira: Sistema de Análise de Fibras e Raízes. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. São Carlos: EMBRAPA; p. 21. 2008.

KANERVA, S., KITUNEN, V., LOPONEN, J., SMOLANDER, A. Phenolic compounds and terpenes in soil organic horizon layers under silver birch, Norway spruce and Scots pine. **Biology and Fertility of Soils**. v. 44. p. 547–556. 2008.

KASPARI, M., GARCIA, M. N., HARMS, K. E., SANTANA, M., WRIGHT, S. J., YAVITT, J. B. Multiple nutrients limit litterfall and decomposition in a tropical forest. **Ecology Letters**. v. 11. p. 35–43. 2008.

KRISHNA, M. P., MOHAN, M. Litter decomposition in forest ecosystems: a review. **Energy, Ecology and Environment**. v. 2. p. 236–249. 2017. DOI: 10.1007/s40974-017-0064-9.

LÁZARO-DZUL, M. O., et al. Fertilization with nitrogen, phosphorus and potassium in *Pinus patula* Schl. et cham samplings. **Revistas Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**. v.18. p. 33–42. 2012.

LEHTO, T. Effects of soil pH and calcium on mycorrhizas of *Picea abies*. **Plant Soil**. v.163. p. 69–75. 1994.

LEÓN-SÁNCHEZ, M. A., REYES-POZO, J. L., HERRERO-ECHEVARRÍA, G., PÉREZ-LEÓN, V. E. The effect of fertilization on growth, in diameter and height, of *Pinus caribaea* in plantations of western Cuba. **Madera y Bosques**. v. 22. p.87–101. 2016.

LIN, H., HE, Z., HAO, J., TIAN, K., JIA, X., KONG, X., AKBAR, S., BEI, Z., TIAN, X. Effect of N addition on home-field advantage of litter decomposition in subtropical forests. **Forest Ecology and Management**. v. 398. p. 216–225. 2017.

LONDERO, E. K., SCHUMACHER, M. V., SZYMCZAK, D. A., VIERA, M. Exportação e reposição nutricional no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L. em área de segunda rotação. **Ciência Florestal**. v. 21. p. 487–497. 2011.

LOPES, V. G., SCHUMACHER, M. V., MÜLLER, I., CALIL, F. N., WITSCHORECK, R., LIBERALESSO, E. Physical and chemical soil variables affecting *Pinus taeda* L. fine roots distribution in northeast of Rio Grande do Sul, Brazil. **Ecologia e Nutrição Florestal**. v.1. p. 14–23. 2013.

LOPES, V. G., SCHUMACHER, M. V., CALIL, F. N., et al. Fine root quantification in a *Pinus taeda* L. stand and in grassland area in Cambará do Sul (RS). **Ciência Florestal**. v. 20. p. 569–578. 2010.

LOPEZ-ESCOBAR, N. F., et al. Reservoirs and nutrient dynamics in two stands of *Pinus montezumae* Lamb. in Tlaxcala, Mexico. **Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**. v. 24. p. 115–129. 2017.

MANAVALAN, T., MANAVALAN, A., HEESE, K. Characterization of Lignocellulolytic Enzymes from White-Rot Fungi. **Current Microbiology**. v. 70. p. 485–498. 2015.

MATEIRĆ, D., BLENKHORN, D., et al. Monoterpene emission from young scots pine may be influenced by nutrient availability. **Applied Ecology and Environmental Research**. v. 14. p. 667–681. 2016.

MINEROPAR. **Mapa Geológico do estado do Paraná: Unidades Estratigráficas** [Internet]. p. 21–22. 2010.

MORO, L., GATIBONI, L. C., SIMONETE, M. A., CASSOL, P. C., CHAVES, D. M. Response of one-, five-, and nine-year-old *Pinus taeda* to NPK fertilization in southern brazil. **Brazilian Journal of Soil Science**. v. 38. p. 1181–1189. 2014.

MOTTA, A. C. V., BARBOSA, J. Z., CONSALTER, R., REISSMANN, C. B. Nutrição e Adubação da Cultura de Pínus. In: Prado R de M, Wadt PGS (eds) **Nutrição e adubação de espécies florestais e palmeiras**, 1st edn. FUNEP, Jaboticabal, pp 383–426. 2014.

OSTONEN, I., PÜTTSEPP, Ü., et al. Specific root length as an indicator of environmental change. **Plant Biosystems**. v. 141. p. 426–442. 2007.

PÉRTILE, P., ALBUQUERQUE, J. A., GATIBONI, L. C., COSTA, A. DA, WARMLING, M. I. Application of alkaline waste from pulp industry to acid soil with pine. **Brazilian Journal of Soil Science**. v. 36. p. 939–950. 2012.

PINNO, B. D., LIEFFERS, V. J., LANDHÄUSSER, S. M. Inconsistent Growth Response to Fertilization and Thinning of Lodgepole Pine in the Rocky Mountain Foothills is linked to Site Index. **International Journal of Forestry Research**. p. 1–7. 2012.

PIOVESAN, G., SCHUMACHER, M. V., VIERA, M., LOPES, V. G., WELTER, C. Deposição de serapilheira em povoamento de Pinus. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v. 42. p. 206–211. 2012.

PRAVEEN, K., USHA, K. Y., VISWANATH, B., RAJASEKHAR REDDY, B. Kinetic properties of manganese peroxidase from the mushroom *Stereum ostrea* and its ability to decolorize dyes. **Journal of Microbiology and Biotechnology**. v. 22. p. 1540–1548. 2012.

REISSMAN, C. B., ZÖTTL, H. W. Problemas nutricionais em povoamentos de *Pinus taeda* em áreas do arenito da formação Rio Bonito-Grupo Guatá. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**. p. 75–80. 1987.

RODRIGUES, C. M. **Efeito da aplicação de resíduo da indústria de papel e celulose nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, na nutrição e biomassa do *Pinus taeda* L.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 109p. 2004.

RODRÍGUEZ-ROBLES, U., ARREDONDO, T., HUBER-SANNWALD, E., et al. Application of geophysical tools for tree root studies in forest ecosystems in complex soils. **Biogeosciences Discussions**. p. 1–22. 2017. doi: 10.5194/bg-2017-91

- SAMUELSON, L. J., JOHNSEN, K., STOKES, T. Production, allocation, and stemwood growth efficiency of *Pinus taeda* L. stands in response to 6 years of intensive management. **Forest Ecology and Management**. v. 192. p. 59–70. 2004.
- SAYER, M. A. S., GOELZ, J. C. G., et al. Long-term trends in loblolly pine productivity and stand characteristics in response to thinning and fertilization in the West Gulf region. **Forest Ecology and Management**. v.192. p. 71–96. 2004.
- SCHUMACHER, M. V., VIERA, M., WITSCHORECK, R. Litter production and nutrients transfer in a second rotation area with *Pinus taeda* L. forest in Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**. v. 18. p. 471–480. 2008.
- SCOTT, D. A., BLISS, C. M. Phosphorus fertilizer rate, soil P availability, and long-term growth response in a loblolly pine plantation on a weathered Ultisol. **Forests**. v. 3. p. 1071–1085. 2012.
- SELOSSE, M. A., RICHARD, F., HE, X., SIMARD, S. W. Mycorrhizal networks: des liaisons dangereuses? **Trends in Ecology and Evolution**. v. 21. p. 621–628. 2006.
- SIXEL, R. M. DE M., ARTHUR, J. C., et al. Sustainability of wood productivity of *Pinus taeda* based on nutrient export and stocks in the biomass and in the soil. **Brazilian Journal of Soil Science**. v. 39. p. 1416–1427. 2015.
- SONG, Y. Y., et al. Defoliation of interior Douglas-fir elicits carbon transfer and stress signalling to ponderosa pine neighbors through ectomycorrhizal networks. **Scientific reports**. v. 5, p. 8495, 2015.
- STAAF, H., PERSSON, T., BERTILLS, U. **Resultat och slutsatser från Naturvårdsverkets försöksverksamhet**. STAAF, H., PERSSON, T., BERTILLS, U., organizador. Stockholm: Naturvårdsverkets förlag; 1996.
- SUDMEYER, R. A., SPEIJERS, J., NICHOLAS, B. D. Root distribution of *Pinus pinaster*, *P. radiata*, *Eucalyptus globulus* and *E. kochii* and associated soil chemistry in agricultural land adjacent to tree lines. **Tree physiology**. v. 24. p. 1333–1346. 2004.
- SUN, O. J., PAYN, T. I. M. W. Magnesium nutrition and photosynthesis in *Pinus radiata*: clonal variation and influence of potassium. **Tree physiology**. v. 19. p. 535–540. 1999.
- TREVISAN, E. **Classificação e Caracterização de Horizontes Orgânicos sob Povoamentos de *Pinus taeda* L na Região de Ponta Grossa - PR -**. Universidade Federal do Paraná. 1992.
- TRICHET, P., LOUSTAU, D., LAMBROT, C., LINDER, S. Manipulating nutrient and water availability in a maritime pine plantation: effects on growth, production, and biomass allocation at canopy closure. **Annals of Forest Science**. v. 65. p. 814–814. 2008.

TRICHET, P., BAKKER, M. R., et al. France: The Importance of Phosphorus as a Fertilizer. **Forest Science**. v. 55. p. 390–402. 2009.

UFOT, U. F., ITE, A. E., USOH, I. H., AKPANABIATU, M. I. Role of Some Metal Ions on Steady–state Kinetics of Engineered Wild–type and Manganese (II) Binding Site Mutants of Recombinant *Phlebia radiata* Manganese Peroxidase 3 (rPr-MnP3). **American Journal of Medical and Biological Research**, v. 4, p. 42-52. 2016.

VANNINEN, P., MAKELA, A. Fine root biomass of Scots pine stands differing in age and soil fertility in southern Finland. **Tree Physiology**. v.19. p. 823–830. 1999.

VIERA, M., SCHUMACHER, M. V. Concentração e retranslocação de nutrientes em acículas de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**. v. 19. p. 375–382. 2009.

VIERA, M., SCHUMACHER, M. V. Teores e aporte de nutrientes na serapilheira de *Pinus taeda* L., e sua relação com a temperatura do ar e pluviosidade. **Revista Árvore**. v. 34. p. 85–94. 2010. doi: 10.1590/S0100-67622010000100010

WANG, L., KATZENSTEINER, K., SCHUME, H., VAN LOO, M., GODBOLD, D. L. Potassium fertilization affects the distribution of fine roots but does not change ectomycorrhizal community structure. **Annals of Forest Science**. v. 73. p. 691–702. 2016.

WIGHTMAN, M. G., MARTIN, T. A., et al. Loblolly pine productivity and rater relations in response to throughfall reduction and fertilizer application on a poorly drained site in Northern Florida. **Forests**. v. 7. p. 214. 2016.

WISNIEWSKI, C. **Variação estacional da deposição de serapilheira e nutrientes em povoamentos de *Pinus taeda* na região de Ponta Grossa-PR** [Internet]. Universidade Federal do Paraná; 1989.

ZHAO, D., KANE, M., BORDERS, B., HARRISON, M. Long-term effects of site preparation treatments, complete competition control, and repeated fertilization on growth of slash pine plantations in the flatwoods of the southeastern United States. **Forest Science**. v. 55. p. 403–410. 2009.

## 4 CAPÍTULO III. CALAGEM E FERTILIZAÇÃO EM PLANTIO ESTABELECIDO DE *P. taeda* L. EM ARAPOTI/PR: INGRESSO DE NUTRIENTES NO CICLO BIOGEOQUÍMICO

### 4.1 RESUMO

Plantios de *P. taeda* L. em solos pobres em nutrientes e com elevada acidez, apresentam carências nutricionais que limitam o crescimento. Todavia, além do conhecimento das carências, também é necessário o conhecimento sobre a participação desses nutrientes adicionados na ciclagem biogeoquímica de nutrientes típica de essências florestais. Assim, o presente experimento estudou a dinâmica dos nutrientes aplicados, via fertilização e calagem, sobre a serapilheira e *status* nutricional de um plantio estabelecido de *P. taeda* L. em Arapoti/PR. Foi realizada uma coleta pontual de material (acículas e serapilheira com raízes) em um experimento de diagnose nutricional por omissão de nutrientes em *P. taeda* L., que contempla os tratamentos: Completo (N, P, K, Ca, Mg, B, Zn, Cu e Mo), -NPK, -Micronutrientes, -K, -Zn, -Calcário e Testemunha. Foram realizadas duas aplicações de 40, 60, 80, 3, 2 e 1,5 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Zn, B e Cu, Mo na dose de 20 g ha<sup>-1</sup> e 1,3 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário. Os tratamentos de fertilização foram aplicados quando o plantio tinha cinco e sete anos e a coleta quando o plantio tinha 12 anos. As principais carências apontadas pelas concentrações de nutrientes nas acículas foram Ca (1.95 e 1.35 g kg<sup>-1</sup> MS de Ca nas acículas de 1º e 2º lançamento, na testemunha) e Mg (0.80 e 0.97 g kg<sup>-1</sup> MS), que apresentaram, analogamente, acréscimos médios em função da aplicação de 95 e 52%, em acículas de 1º e 2º lançamento, respectivamente. Para o Zn (8.4 e 16 mg kg<sup>-1</sup> MS) esses valores seriam de 85 e 79%. Foi possível verificar também que a aplicação de calcário sobre a serapilheira amenizou o sintoma de auto toxidez por Mn (587 e 413 mg kg<sup>-1</sup> MS) observado em *P. taeda* L., resultando na redução média de 34% na concentração de Mn nas acículas. Esses efeitos se refletiram sobremaneira nos horizontes Ln e Lv da serapilheira, indicando que a composição desses horizontes é determinada principalmente pela composição das acículas depositadas. A serapilheira ainda continha 98, 84, 12, 83 e 226% dos conteúdos de Ca, Mg, P, Zn e Cu aplicados. Ocorreu retenção desses nutrientes nos horizontes Lf e Lh em função de suas características físico-químicas relacionadas com o maior grau de humificação do material orgânico depositado. A calagem diminuiu a perda de Mn no processo de humificação da serapilheira, basicamente dobrando a concentração do nutriente nos horizontes Lf e Lh. Também foi observado aumento da incorporação de S exógeno (possivelmente oriundo de deposição atmosférica) nos horizontes Lf e Lh, em função da calagem. Não há relação entre a fertilização e as concentrações de Fe e Al na serapilheira, ficando o conteúdo acumulado dependente da quantidade de serapilheira acumulada. Depois da própria serapilheira, as raízes apresentaram as maiores respostas para Ca, Mg, Zn e Cu. As concentrações de S e Mn nas raízes não seguem o aumento observado na serapilheira em função da calagem, indicando que o teor as raízes podem não ser um indicativo eficiente da disponibilidade de Mn.

Palavras-Chave: Sítio florestal, IMA, Produtividade de madeira, ciclagem, nutrição.



## 4.2 ABSTRACT

*P. taeda* L. stands in soils poor in nutrients and with high acidity, present nutritional deficiencies that limit the growth. However, besides the knowledge of the deficiencies, it is also necessary to have the knowledge about the participation of these added nutrients in the biogeochemical cycling of nutrients typical of forest essences. Therefore, the present experiment studied the dynamic of the nutrients applied, through fertilization and liming, on the litter and nutritional status of an established plantation of *P. taeda* L. in Arapoti/PR. It was performed a punctual collection of materials (aciculae and litter with roots) in a nutritional diagnosis experiment by the nutrients omission in *P. taeda* L., that contemplates the treatments: Complete (N, P, K, Ca, Mg, B, Zn, Cu and Mo), -NPK, -Micronutrients, -K, -Zn, -Lime and Control. Were performed two applications of 40, 60, 80, 3, 2 and 1,5 kg ha<sup>-1</sup> of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Zn, B and Cu, Mo at the dose of 20 g ha<sup>-1</sup> and 1.3 Mg ha<sup>-1</sup> of lime. The fertilization treatments were applied when the planting was five and seven years old and the collection when the planting was 12 years old. The main deficiencies indicated by the concentration of nutrients at the needles were Ca (1.95 and 1.35 g kg<sup>-1</sup> DM of Ca at the needles of 1° and 2° pine flushes, in the Control treatment) and Mg (0.80 and 0.97 g kg<sup>-1</sup> DM), which presented similar average increases due to the application of 95 and 52%, in needles of 1° and 2° pine flushes, respectively. For the Zn (8.4 and 16 mg kg<sup>-1</sup> DM) those amounts would be of 85 and 79%. It was also possible to verify that the application of lime on the litter softened the symptom of self-toxicity by Mg (587 e 413 mg kg<sup>-1</sup> DM) observed in *P. taeda* L., resulting in a reduction of the Mn concentration in the needles by an average of 34%. These effects were particularly reflected in the Ln and Lv horizons of the litter, indicating that the composition of these horizons is mainly determined by the composition of the deposited needles. The litter still contained 98, 84, 12, 83 and 226% of the contents of Ca, Mg, P, Zn and Cu applied. Retention of this nutrients occurred in the Lf and Lh horizons due to their physicochemical characteristics related to the higher degree of humification of the deposited organic material. The liming decreases the loss of Mn in the litter humification process, basically by doubling the nutrient concentration at the Lf and Lh horizons. It was also observed an increase in the incorporation of exogenous S (possibly from atmospheric deposition) in the horizons Lf and Lh, as a function of liming. There was no connection between the fertilization and the concentration of Fe and Al in the litter, the content accumulated in this way stays dependent on the amount of litter. After the litter itself, the roots had the highest responses for Ca, Mg, Zn and Cu. The concentrations of S and Mn in the roots did not follow the increase observed in the litter as a function of liming, indicating that the roots may not be an efficient indicative of Mn availability.

Key-Words: Forestry site, MAI, Wood yield.



### 4.3 INTRODUÇÃO

A fertilização de *P. taeda* L., baseada em pesquisas que quantificam respostas em produtividade ao fornecimento dos nutrientes a longo prazo, é de importância basal no manejo nutricional de maciços florestais (Fox et al. 2007a, b; Albaugh et al. 2008). A prática de fertilização em plantios estabelecidos deve ser baseada em estudos específicos para essa condição (Bekele et al. 2003), visto que alguns problemas nutricionais, como a carência de P, podem se manifestar apenas em plantios estabelecidos (Fox et al. 2007a).

A região de Arapoti/PR abriga um dos maiores polos florestais do estado, sendo que  $\frac{3}{4}$  de toda a área ocupada por plantios florestais madeireiros no Paraná é com Pinus (ABRAF 2013). A maior parte dos plantios de Pinus implantados no estado do PR utilizam-se da espécie *P. taeda* L., devido à sua boa adaptação as condições edafoclimáticas locais (Piovesan et al. 2012; Motta et al. 2014; Batista et al. 2015).

Em sua maioria, os plantios de essências florestais como pinus e eucalipto são realizados em solos com fertilidade química baixa demais para culturas anuais. A região de Arapoti apresenta como material geológico os Arenitos Furnas e Itararé, ou seja, apresenta naturalmente solos pobres em nutrientes e com baixo poder tampão devido ao baixo teor de argila, (Mineropar 2010). Não obstante, solos sob a vegetação nativa predominante da região dos Cerrado são naturalmente ácidos e apresentam elevada saturação por Al tóxico (Lopes e Cox 1977).

O cultivo de *P. caribaea* M. em solo de Cerrado, no oeste de Minas Gerais, com condições extremas em termos de disponibilidade de nutrientes e acidez, apresenta problemas nutricionais envolvendo desde sintomas visuais de carência nutricional até morte de plantas (Chaves e Corrêa 2003, 2005). Os autores reportam que os principais fatores envolvidos seriam a carência de Ca e Mg e a toxidez por Mn. Para o *P. taeda* L. na região de Arapoti/PR já foram relatados problemas com carência de P, Ca, Mg e Zn e toxidez por Mn (Reissmann e Zöttl 1987; Motta et al. 2014; Batista et al. 2015; Reissmann e Wisniewski 2015). O conhecimento das carências nutricionais dos plantios de Pinus em escala regional é de fundamental importância para elaboração da composição nutricional da fertilização.

Nesse sentido, a resposta à fertilização na concentração de nutrientes nas acículas de *P. taeda* L. pode ser considerado um efetivo indicativo da disponibilidade

e carência de nutrientes (Sybert, 2006), visto que é o resultado final da interação de uma série de fatores. Ainda em termos de status nutricional das plantas, a concentração de nutrientes como P, K, Ca e Mg nas raízes presentes na serapilheira também pode ser considerado um reflexo direto da efetiva disponibilidade desses nutrientes (Lopes et al., 2013).

Todavia, em condições quimicamente sensíveis como as da região de Arapoti/PR, a simples determinação, mesmo que de forma regional, de doses de fertilizantes a serem aplicados em plantios estabelecidos de *Pinus* para se obter a melhor resposta em produtividade, apesar da grande importância prática (Fox et al. 2007a, b; Albaugh et al. 2008), por si só não parece ser sustentável em um prazo mais longo, visto que cultivos consecutivos acentuariam as diferenças entre as quantidades de nutrientes aplicadas para atingir uma dada resposta em produtividade e o respectivo conteúdo de nutrientes exportados.

Assim, se faz necessário um melhor entendimento sobre a entrada e a dinâmica dos nutrientes aplicados via fertilização no ciclo biogeoquímico de nutrientes e conservação de nutrientes na serapilheira. A adubação de plantio estabelecido de *P. radiata* com resíduo celulósico alcalino (pH = 8,5) resultou em aumento na concentração de N, K, S e Mn na serapilheira (Xue et al., 2015).

Todavia, a utilização de resíduo de composição nutricional variável não permite a estimativa da conservação dos nutrientes na serapilheira, nem identificar possíveis aumentos da transferência de nutrientes do solo para a serapilheira. Por exemplo, plantas de *P. taeda* L. possuem uma notável habilidade em aquisição de K do solo (Alves et al., 2013), ao mesmo tempo ocorre transferência contínua do nutriente do solo para a serapilheira (Shepard and Mitchell, 1990; Alves et al., 2013), e o nutriente é requerido em maiores quantidades para suportar maiores taxas de crescimento pelas plantas (Marschner, 2012). Dessa forma, a aplicação de outros nutrientes mais limitantes ao crescimento de *P. taeda* L. teria potencial para afetar o ciclo geoquímico de K no sistema, mesmo sem sua aplicação.

Nesse sentido, foi observado que a aplicação de calcário em plantio estabelecido de *P. taeda* L. em Arapoti/PR resultou em manutenção de níveis mais altos de Ca e Mg na serapilheira por pelo menos dois anos (Batista et al., 2015), indicando capacidade de conservação também desses nutrientes pela serapilheira de *Pinus*. Todavia, a calagem pode ser determinante na estabilidade e solubilidade de compostos, regulando sobremaneira o equilíbrio químico de minerais no meio

(Lindsay, 1979). Desse modo, pode afetar de forma individualizada a mobilidade e a afinidade de nutrientes como Fe, Mn, Cu e Zn por compostos orgânicos (Sims 1986; Marschner and Wilczynski 1991; Pegoraro et al. 2006; Hernandez-Soriano et al. 2013; Grobelak et al. 2016; Bravo et al. 2017; Rosas-Patiño et al. 2017) e alterar a população decompositora do material orgânico na serapilheira (Blagodatskaya and Anderson 1998).

Dessa forma, a avaliação de respostas biológicas que indiquem o *status* nutricional das plantas, como a concentração de nutrientes nas acículas e raízes da serapilheira, torna-se interessante para que se possa prever potenciais desordens nutricionais que seriam desencadeadas pela fertilização. Portanto, o objetivo do presente estudo é ampliar o conhecimento sobre a dinâmica dos nutrientes aplicados, via fertilização e calagem, sobre a serapilheira de plantios estabelecidos de pinus, através de uma avaliação pontual do status nutricional das plantas e conteúdo de nutrientes na serapilheira, após sete anos da implantação de experimento de omissão de nutrientes em *P. taeda* L., cultivado em solo ácido e pobre em nutrientes.

#### 4.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi implantado em um plantio de *P. taeda* L. com 63 meses de idade, localizado no município de Arapoti/PR, segundo planalto paranaense. O material de origem do solo é arenito. A vegetação nativa predominante na região é o Cerrado e o clima é uma transição entre subtropical com verões quentes (Cfa) e subtropical com verões amenos (Cfb) (Alvares et al. 2013).

As árvores foram dispostas em espaçamento de três metros entre linhas e dois metros entre plantas, sendo as mudas foram provenientes de sementes e cultivadas em tubetes. O experimento foi implantado em novembro de 2008. A coleta de dados aconteceu sete anos depois, em novembro de 2015.

Foram aplicados sete tratamentos, os quais foram delineados de forma a se realizar um estudo de diagnose nutricional por omissão. O tratamento Completo constou de macronutrientes (NPK), calcário (Ca e Mg) e micronutrientes (Zn, Cu, B e Mo). Os demais tratamentos foram: 2) -NPK (omissão de NPK), 3) -Micro, 4) -K, 5) - Zn, 6) - Calcário e 7) Testemunha. Foram realizadas quatro repetições para cada tratamento, com o delineamento experimental de blocos ao acaso.

As fontes dos fertilizantes foram pesadas individualmente e armazenadas em sacos plásticos. Apenas o calcário foi pesado no local, e foi aplicado separadamente, logo após a fertilização. Os tratamentos foram aplicados em duas parcelas, a primeira em novembro de 2008 e a segunda em fevereiro de 2010. A aplicação foi feita de forma manual, superficial, e em área total.

Cada aplicação constou do correspondente à 40, 60, 80, 3, 2 e 1,5 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Zn, B e Cu, além de Mo, na dose de 20 g ha<sup>-1</sup>. As fontes foram, respectivamente: ureia, superfosfato triplo, cloreto de potássio, sulfato de zinco, ulexita e sulfato de cobre e molibdato de sódio. O calcário dolomítico, na dose de 1,3 Mg ha<sup>-1</sup>, com 28.9% de CaO e 19.9% de MgO, e PRNT de 89.4%. A quantidade de CaCO<sub>3</sub> e MgCO<sub>3</sub> foi calibrada em ordem de fornecer a mesma quantidade, em mol, de Ca e Mg.

As parcelas continham 16 árvores centrais cada (dispostas no esquema 4 linhas x 4 plantas) e uma bordadura de linhas de uma ou duas plantas. Após a demarcação dos tratamentos, as plantas de pinus tiveram os galhos serrados manualmente à altura de 2m.

Na última semana de novembro de 2015 foi realizada a coleta de amostras. As três árvores dominantes de cada parcela foram abatidas. O critério de dominância foi o valor do DAP (os três maiores DAP's dentre as árvores de cada parcela), todavia não foram selecionadas árvores favorecidas pela mortalidade natural de plantas adjacentes, bifurcadas ou que apresentavam tortuosidade.

Das árvores abatidas foram coletadas acículas, de 1º e 2º lançamentos, de cada um dos três terços da copa, nos quatro sentidos cardeais. Através de amostragem composta, de cada parcela obtiveram-se duas amostras de acículas de 1º e 2º lançamentos.

Amostras de serapilheira foram retiradas de quatro pontos por parcela, uma em cada quadrante da parcela. A amostragem foi feita com gabarito de 10 x 10 cm, sendo o material vegetal cortado com uma lâmina até atingir o solo. Retirou-se a serapilheira das laterais, para permitir a retirada das amostras indeformadas.

A serapilheira foi levada ao laboratório, indeformada, através de armazenamento em sacos de papel. No laboratório foram divididas em Ln (acícula que não quebrava ao tentar se fazer um laço, senescida recentemente), Lv (acículas quebradiças), Lf (horizonte orgânico onde os resíduos orgânicos encontram-se fragmentados e parcialmente decompostos, com presença de raízes) e Lh (horizonte

orgânico onde não se reconhece mais o tecido que deu origem ao material, com presença de raízes). Para cada horizonte foi criada uma amostra composta por parcela.

As amostras do horizonte Lh foram lavadas por imersão em 4 dm<sup>3</sup> de água deionizada para retirada de partículas de solo. Para as amostras de serapilheira dos horizontes Lf e Lh foi retirada uma sub amostra, com cerca de 10% da amostra total, onde as raízes foram separadas. As sub amostras de serapilheira (com raízes) foram individualmente espalhadas em bandeja de polipropileno, de cor branca e com fundo plano, e as raízes foram separadas por catação com auxílio de pinça e, quando necessário, lupa de aumento de 30x. Assim, para os horizontes Lf e Lh tem-se amostras de serapilheira completa (com raízes), serapilheira sem raízes e raízes.

Todas as amostras (Ln, Lv, Lf com raízes, Lf sem raízes, raízes do Lf, Lh com raízes, Lh sem raízes, raízes do Lh) foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 65°C, por 48 horas.

Em seguida foram retiradas da estufa, deixadas em ambiente por 45 minutos. As amostras de serapilheira com raízes e serapilheira foram pesadas em balança de precisão com quatro casas após a vírgula.

As amostras dos horizontes Ln e Lv foram picadas com tesoura de cinco lâminas, das acículas e dos horizontes Lf e Lh foram moídas em moinho tipo Thomas Wiley equipado com peneira de 1 mm. As amostras de raízes foram acondicionadas em saco plástico tipo ziploc, e os sacos foram amassados na palma da mão até que restassem apenas segmentos de raízes menores do que um cm de comprimento.

Para as acículas foi pesado 1 g de material, dos horizontes orgânicos foram pesados 3 g, e para as raízes 0,5 g, em cadinhos de porcelana. Os cadinhos com amostras foram encaminhados para mufla, configurada para atingir e manter a temperatura de 500 °C por 3 horas. Após o interior da mufla atingir temperatura ambiente, as cinzas no interior dos cadinhos foram totalmente solubilizadas com três a cinco gotas de solução de HCl 3%. As amostras foram então novamente submetidas à digestão em mufla por 3h a 500 °C.

Após o interior da mufla ganhar temperatura ambiente novamente as amostras foram então resolubilizadas, ainda dentro dos cadinhos de porcelana, com 10 mL de HCl 3M. Os cadinhos foram então encaminhados para chapa aquecedora, regulada para 250 °C, por 10 min.

Para cada amostra (cadinho) montava-se um conjunto balão volumétrico, funil e filtro faixa azul (para as amostras de acículas, horizontes orgânicos e raízes foram utilizados balões volumétricos de, respectivamente, 50, 100 e 25 mL). Por fim, as amostras (cinza solubilizada em HCl 3M) foram vertidas nos balões volumétricos, após toda a amostra passar pelo filtro as cinzas espalhadas pelo filtro foram direcionadas para o fundo do mesmo através de um jato de água. Para esse processo, que foi repetido mais duas vezes, utilizou-se pisseta.

Os balões volumétricos eram então preenchidos até sua capacidade com água deionizada, agitados e o extrato armazenado em coletor com capacidade de 100 mL para posterior determinação da concentração de nutrientes. Cada tipo de tecido (acículas, serapilheira e raízes) foi encaminhado para mufla em remessa individual. Em cada remessa/tecido foram feitas três provas em branco (cadinhos sem amostra), em ordem de se descontar a contaminação intrínseca do procedimento analítico. O processo de digestão de tecidos vegetais foi baseado em Martins e Reissmann (2007).

Nos extratos de digestão das amostras foram determinadas as concentrações de K, Ca, Mg, P, S, Al, B, Zn, Cu, Mn e Fe, através de espectrometria de emissão óptica com plasma (ICP-OES).

As variáveis obtidas foram submetidas a testes de hipóteses lineares (análise de contraste). Foi utilizado o teste de contraste sem transformação. Ao todo, foram testados 14 contrastes (Tabela 3.1). As análises estatísticas foram realizadas utilizando o *software* RStudio versão 0.99.903 – © 2009-2016 R-Studio, Inc. Utilizou-se o pacote estatístico Psych versão 1.7.5 (Revelle 2017). As figuras com os resultados dos contrastes foram plotadas com o software Microsoft Office Excel 2013®, as demais com SigmaPlot 11.0®. As figuras foram unidas para formar as figuras compostas apresentadas com o auxílio do software CorelDraw x5®.

Tabela 3.1. Contrastes testadas em experimento de diagnose por subtração em plantios estabelecido de *Pinus taeda* L. em Arapoti/PR.

Contraste nº	Efeito Conjunto	Tratamentos contrastantes		
1	Adubação*	Fertilizados	x	Testemunha
2	Adubação	Completo	x	Testemunha
3	NPK+Micro	-Calcário	x	Testemunha
4	NPK+Calcário	-Micro	x	Testemunha
5	Micro+Calcário	-NPK	x	Testemunha
6	BMoCu+NPK+Calcário	-Zn	x	Testemunha
7	NP+Micro+Calcário	-K	x	Testemunha
8	NPK	Completo	x	-NPK
9	NP	-K	x	-NPK
10	K	Completo	x	-K
11	Micro	Completo	x	-Micro
12	BMoCu	-Zn	x	-Micro
13	Zn	Completo	x	-Zn
14	Calcário	Completo	x	-Calcário

As diferenças em valor absoluto entre os tratamentos contrastantes são apresentadas juntamente com a significância de cada contraste testado. Para cada variável, os valores médios de cada tratamento são apresentados juntamente com seu desvio padrão.

#### 4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As concentrações de nutrientes nas acículas de *P. taeda* L., mesmo após 7 anos da fertilização, ainda apresentavam variações em decorrência dos tratamentos aplicados ou estudados (Figura 3.1). De todos os elementos avaliados (K, Ca, Mg, P, S, Al, B, Zn, Cu, Mn e Fe) apenas Cu e Fe não apresentaram nenhuma diferença entre os tratamentos no 1º e 2º lançamentos (Figuras 3.1C e 3.1D).



Tratamentos contrastantes contendo K apresentaram acréscimos, entre 0,7 e 1,2 g kg<sup>-1</sup> MS na concentração desse nutriente nos tecidos das acículas de 1º e/ou 2º lançamento (Figura 3.1A, contrastes 1, 4 e 8). A grande capacidade de remobilização interna de K por plantas de *P. taeda* L., de 93,5 ± 2.5 % (Viera e Schumacher, 2009) certamente contribuiu para manutenção do efeito da adubação potássica durante sete anos.

O “sistema Pinus” possui uma notável capacidade de conservação do K aplicado via fertilização também devido aos processos de ciclagem biogeoquímica do nutriente (deposição de serapilheira, precipitação interna e fluxo de caule). Considerando o solo até 45 cm de profundidade, a serapilheira e as plantas, foi observado uma recuperação de 45% de K em um plantio de 57 anos de idade de *P. resinosa* A., a aplicação do K foi feita quando o plantio tinha apenas 18 anos (Shepard e Mitchell, 1990). Esse valor de recuperação, após 39 anos da aplicação, foi observado quando a dose aplicada foi de 118 kg ha<sup>-1</sup> de K; na menor dose (59 kg ha<sup>-1</sup> de K) a recuperação foi de 81%. Talvez o mais interessante a ser observado no trabalho de Shepard and Mitchell (1990) seja que, independente da dose aplicada, a manutenção de K no sistema foi de 50,5 ± 2,5 kg ha<sup>-1</sup> de K.

O efeito do calcário aplicado ainda foi marcante nas concentrações de Ca e Mg nas acículas (Figura 3.1A). Foi verificado incremento de entre 0,5 e 2,0 g kg<sup>-1</sup> MS de Ca e de 0,3 a 1,1 g kg<sup>-1</sup> MS de Mg nos tratamentos com presença de calcário. A dose de calcário aplicada seria suficiente para repor as quantidades de Ca e Mg exportadas, através da colheita dos fustes, por mais de 100 anos de cultivo de *P. montezumae* L. na zona central do México (Lopez-Escobar et al., 2017).

Os maiores incrementos de Ca e Mg foram observados para os tratamentos que não continham K (Figura 3.1A, contrastes 5 e 7). Em solos pobres em Mg, na Nova Zelândia por exemplo, a carência desse nutriente em *P. radiata* pode ser induzida pela maior disponibilidade de K (Sun e Payn, 1999).

Para a concentração de P nas acículas, das hipóteses lineares que testaram os efeitos de conjuntos de nutrientes que contivessem P (contrastos 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9), apenas os contrastes 1, 4, 7 e 9 apresentaram algum resultado significativo, na ordem de 0,2 g kg<sup>-1</sup>. Por outro lado, o tratamento testemunha apresentou concentração de P nas acículas semelhante aos observados em *P. taeda* L. com oito e nove anos de idade, se desenvolvendo em solo oriundo de rocha basáltica

(Viera e Schumacher, 2009; Londero et al., 2011; Sixel et al., 2015). É concebível a ideia que os valores 0,8 e 1,2 g kg<sup>-1</sup> de P em acículas de 1º e 2º lançamento estejam próximos ao nível crítico para manutenção das funções fisiológicas.

A omissão dos micronutrientes resultou em acréscimo de 0,2, 0,1 e 0., g kg<sup>-1</sup> MS de P, S e Al, respectivamente, nas acículas de 1º lançamento. Nesse caso também nota se que a concentração de Al foi de 0,2 g kg<sup>-1</sup> MS maior no tratamento completo em relação à omissão de NPK (Figura 3.1B, contraste 8).

O fornecimento de B, seja no tratamento completo ou no tratamento -Zn, resultou em acículas de 1º e 2º lançamento cerca de 25% mais concentradas em B, isso em comparação com a aplicação de apenas NPK+calcário (Figura 3.1C, contrastes 11 e 12). Também foi verificado alguma interação entre o fornecimento de NP na ausência de K e a concentração de B nas acículas de 1º lançamento. O tratamento -K (NP+Micro+Calcário) apresentou 18,7 contra 11,65 mg kg<sup>-1</sup> MS de B no tratamento testemunha (Figura 3.1C, contraste 7). O tratamento -K foi superior ao tratamento -NPK (Efeito de NP) em 5,5 mg kg<sup>-1</sup> MS de B, enquanto resultado semelhante não foi observado para efeito de NPK (Completo em comparação com o tratamento -NPK).

Plantas de *Eucalyptus* apresentaram baixa seletividade de membrana para B, e a aplicação resultou em absorção e translocação facilitada para as folhas (Ramos et al., 2009). Plantas de *P. taeda* L. podem apresentar menor eficiência do uso de água quando não fertilizadas, todavia, sem redução da taxa fotossintética (Maggard et al., 2016, 2017). Esse efeito possivelmente esteja bastante relacionado com carência de K, levando em conta sua função estômato regulatório (Marschner, 2012). Extrapolando essas condições para o presente experimento seria plausível a ideia de que maior requerimento hídrico em plantas que não receberam K poderia explicar maiores teores de B nas acículas.

As concentrações de 8 e 16 mg kg<sup>-1</sup> MS de Zn nas acículas de 1º e 2º lançamentos, do tratamento testemunha, podem ser consideradas muito baixas quando comparadas com plantas de *P. taeda* L. se desenvolvendo em solos que possivelmente tenham disponibilidade adequada de Zn, oriundos de rocha basáltica (Schumacher et al. 2008; Viera and Schumacher 2009, 2010; Londero et al. 2011).

Assim como para a concentração acicular de P, o único tratamento capaz de resultar em aumento na concentração de Zn nas acículas de ambos lançamentos foi o tratamento -K (Figura 3.1C, contraste 7). Nesse tratamento (-K) os valores de

concentração de Zn nas acículas foram quase o dobro do observado para a testemunha.

A aplicação de P pode promover o crescimento, alterar arquitetura e morfologia radicular de plantas, e geralmente há grande plasticidade do sistema radicular junto a características físico-químicas do solo (Bakker et al., 2009; Marschner, 2012; Lopes et al., 2013; Chen et al., 2016; Zadworny et al., 2016; Meier et al., 2017). A hipótese é de que a disponibilidade de Zn tenha sido ampliada por algum efeito do tratamento -K (NP+Calcário+Micro) no sistema radicular das plantas.

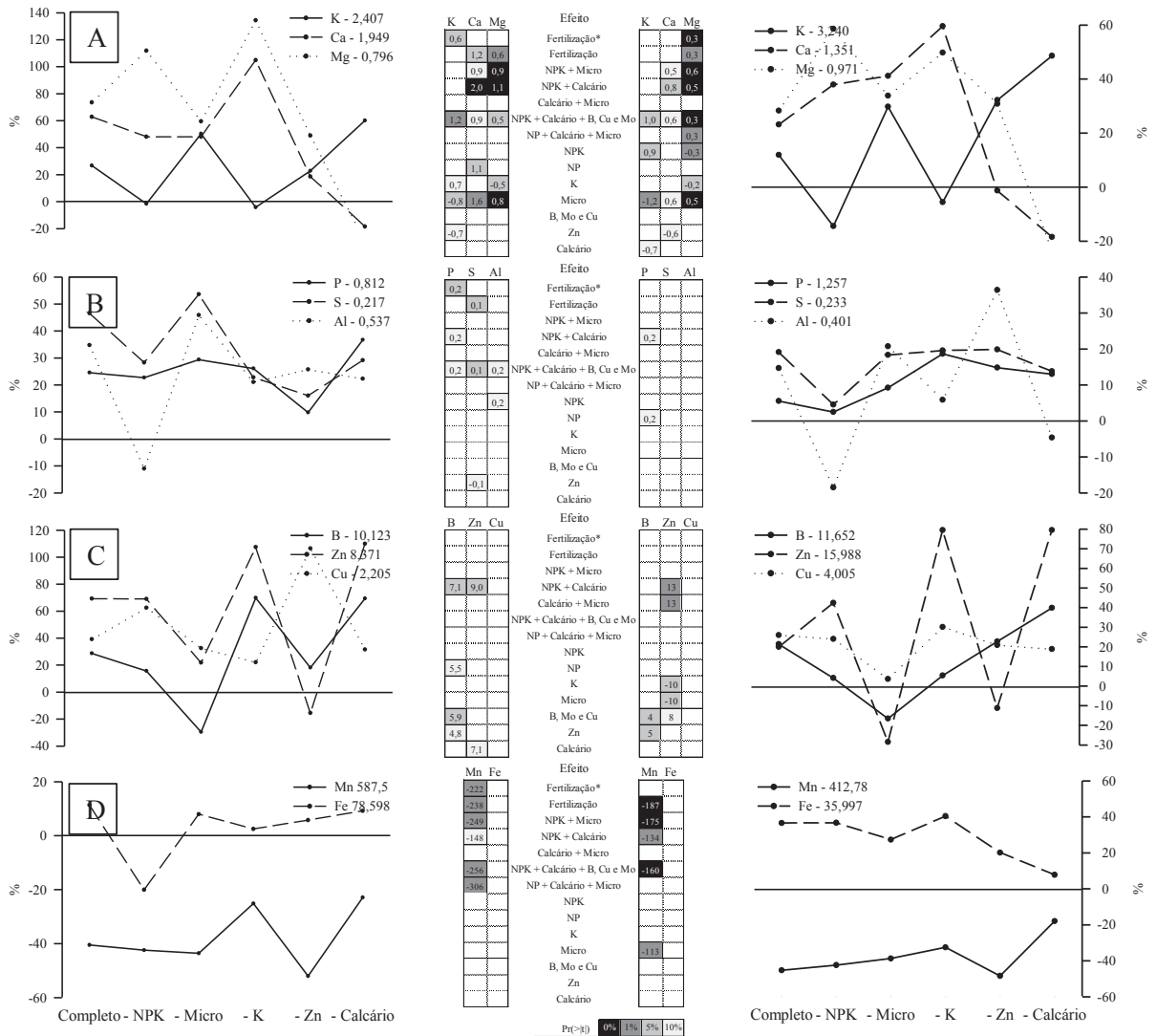
Todavia, para o Cu não foi verificado aumento na concentração acicular. É possível que no presente estudo não tenha ocorrido carência de Cu, visto que os teores foliares deste nutriente estão na média do que é considerado referência para Syfert (2006) ( $3 \text{ mg kg}^{-1}$  MS de Cu nas acículas).

A biodisponibilidade de Mn apresenta grande plasticidade e sensibilidade frente a aplicação de calcário (Bravo et al., 2017; Rosas-Patiño et al., 2017). A aplicação na superfície da serapilheira reduziu consideravelmente o acúmulo desse nutriente nas acículas de 1º e 2º lançamento de *P. taeda* L. Esse resultado demonstra a importância da ciclagem biogeoquímica de nutrientes via serapilheira na nutrição das plantas.

Todos os tratamentos que continham calcário resultaram em plantas com concentração mais baixa de Mn nas acículas (Figura 3.1D, contrastes 1, 2, 4, 5, 6, 7 e 14). As plantas que foram submetidas aos tratamentos Completo, -NPK, -Micro e -Zn apresentaram acículas de 1º e 2º lançamento na ordem de  $272 \pm 34$  e  $174 \pm 14 \text{ mg kg}^{-1}$  MS menos concentradas em Mn, em comparação com tratamento testemunha (Contraste 5). O efeito alcalinizante do calcário, aplicado sobre a serapilheira, é responsável pela redução da disponibilidade do Mn e consequente menor acúmulo nas acículas. Aplicações contínuas de biosólido de pH 8.5, em *P. radiata* na Nova Zelândia, reduziram a concentração de Mn nas acículas em pelo menos  $80 \text{ mg kg}^{-1}$  MS (Wilks et al., 2009; Xue et al., 2015).

Todavia, no tratamento -K, as reduções nos valores de concentração de Mn, nas acículas de 1º e 2º lançamento foram menores do que nos demais tratamentos, apenas  $148$  e  $134 \text{ mg kg}^{-1}$  MS de Mn (Figura 3.1D).

FIGURA 3.1. Alteração porcentual, em relação ao tratamento testemunha, no teor de nutrientes das acículas de 1º (figuras na coluna da esquerda) e 2º (coluna da direita) lançamentos de *P. taeda* L. sete anos após a implantação de experimento de omissão de nutrientes. Ao centro estão as hipóteses lineares (HL) testadas para se determinar o efeito dos tratamentos. Os números dentro de cada célula, referentes a cada HL testada, se referem as diferenças, em valor absoluto, entre os tratamentos contrastantes.



A fertilização resultou em acréscimo na concentração dos macronutrientes aplicados, bem como de S e Al, nas acículas das plantas (Figura 3.1).

Após sete anos da implantação do experimento, a concentração elementar na serapilheira foi influenciada pela fertilização (Figura 3.2). Os incrementos em concentração de K na serapilheira basicamente se limitam aos horizontes Ln e Lv (Figura 3.2A), que possuem influência direta da queda de acículas (Piovesan et al., 2012). Considerando um valor base de 10 Mg ha<sup>-1</sup> para a soma dos horizontes Ln e Lv, teria sido aplicado uma dose equivalente a 657 mg kg<sup>-1</sup> de K, e após sete anos

da aplicação esses horizontes se apresentaram em média apenas 200 mg kg<sup>-1</sup> mais concentrados em K (Figura 3.2A, contrastes 1, 2, 3, 4, 8, 9 e 10).

Apesar do acréscimo observado para os horizontes superficiais da serapilheira (Ln e Lv) não se nota incremento na concentração de K nos horizontes de material orgânico fragmentado e humificado (Lf e Lh), indicando que nesses dois horizontes a baixa capacidade de retenção de K é intrínseca (em média 0,6 g kg<sup>-1</sup> MS de K) e que grande parte do K aplicado não permaneceu na serapilheira. Mesmo após 13 anos de aplicações de resíduo sólido de tratamento de água, em *P. radiata* na Nova Zelândia, a serapilheira seguia apresentando 1,05 ± 0,05 g kg<sup>-1</sup> MS de K (Xue et al., 2015).

É possível que a reserva de K, responsável pela melhor nutrição das plantas fertilizadas, esteja no solo. Nesse sentido, por exemplo, adubação com K aumentou a exploração do solo por raízes de *Picea abies* (Wang et al., 2016). Por outro lado, um plantio estabelecido de *Pinus montezumae* L., cultivado na zona central do Chile, utiliza apenas 1,06 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de K que não seja oriundo da serapilheira (ciclagem geoquímica) ou da própria planta (ciclagem bioquímica ou remobilização interna) (Lopez-Escobar et al., 2017).

Com base nesses dois aspectos da ciclagem biogeoquímica de K em pinus (alta eficiência da ciclagem e baixa retenção de K pela serapilheira), infere-se que a aplicação de K, mesmo em plantios estabelecidos, quando implantados sobre solos com baixa capacidade tampão para K, fica sujeita a perda parcial desse nutriente via lixiviação.

O efeito dos tratamentos que continham calcário na concentração de Ca e Mg na serapilheira é claro (Figura 3.2B e 3.2C). Os horizontes superficiais (Ln e Lv) se apresentaram entre 0,8 e 3,5 e entre 0,5 e 1,0 g kg<sup>-1</sup> MS mais concentrados em Ca e Mg do que na testemunha (acrécimo pertinente ao observado para as concentrações desses nutrientes nas acículas de 1º lançamento). Os maiores incrementos na concentração de Ca e Mg no Ln e Lv, foram observados nos tratamentos que não continham K na composição, acompanhando ao observado para as concentrações de Ca e Mg nas acículas (Figuras 3.1A, 3.2B e 3.2C, contrastes 5 e 7).

Por outro lado, os valores de incremento de Ca e Mg nos horizontes Lf e Lh foram de 4 a 5 vezes os valores observados nos horizontes Ln e Lv, indicando acúmulo dos nutrientes aplicados devido a características físico-químicas da

serapilheira. Todavia, os valores de efeitos negativos de NPK e de K observados (Figuras 3.2B e 3.2C) indicam que a ciclagem biogeoquímica de detritos vegetais, típica de sistemas dessa natureza, também seja responsável pelas concentrações de Ca e Mg observadas no horizonte Lf.

No sul do Brasil, plantios de *P. taeda* L. com entre 5 a 8 anos de idade, tem apresentado deposição média de serapilheira na ordem de 4,72 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Schumacher et al., 2008; Viera e Schumacher, 2010b; Piovesan et al., 2012). Com valores de deposição anual dessa magnitude é compreensível que, após sete anos da aplicação dos tratamentos, onde as plantas apresentaram acículas menos concentradas em Ca e Mg (tratamentos com K, figura 3.1A, contrastes 8 e 10) ocorra menor concentração desses nutrientes no horizonte Lf (Figuras 3.2B e 3.2C, contrastes 8 e 10).

Com exceção da comparação entre o tratamento –K (NP+Calcário+Micro) e a testemunha (contraste 7), todos os demais contrastes que avaliaram o efeito do fornecimento de algum conjunto de nutrientes contendo P apresentaram algum efeito significativo para aumento entre 0,1 e 0,4 g kg<sup>-1</sup> MS de P nos horizontes Ln e/ou Lv e/ou Lf e/ou Lh (Figura 3.2D, contrastes 1, 2, 3, 4, 6, 8 e 9).

Esse talvez seja o principal indicativo da hipótese de que haja interação entre o fornecimento de P na ausência de K e o sistema radicular das plantas. Infere-se que houve aumento do sistema radicular, o que reduziria o transporte de P para a parte aérea, visto a rota preferencial de absorção do fosfato pelas plantas, rota simplástica (Marschner, 2012). A carência de apenas K aumentou a relação raiz/parte aérea de plantas de mamona (*Ricinus communis*) de 1,8 para 2,6 unidades (Peuke et al., 2002) e aumentou em 50% o volume de raízes em milheto (*Pennisetum glaucum*) (Rosolem et al., 2003).

Os tratamentos que continham calcário apresentaram acréscimos entre 0,1 e 0,4 g kg<sup>-1</sup> MS na concentração de S nos horizontes Lv e/ou Lf e/ou Lh (Figura 3.2E, contrastes 1, 2, 4, 5 e 6).

Embora o S não tenha sido aplicado como adubo, constatou-se aumento da concentração do mesmo nos horizontes mais decompostos da serapilheira (Lf e Lh), o que demonstra que o calcário aplicado pode ser responsável por maior estabilidade do S na serapilheira. A serapilheira contém S oriundo do solo, pelo processo natural de formação da liteira (Sixel et al., 2015), e de deposição atmosférica (Sardans et al., 2016; Zetterberg et al., 2016). Um possível aumento de

pH provocado pela aplicação de calcário não explicaria a maior estabilidade do S na serapilheira. Por outro lado, maior atividade de  $\text{Ca}^{2+}$  pode ter contribuído diretamente para a estabilização do S através da formação de sulfato (Lindsay, 1979; SBCS, 2007).

A passagem do pH da serapilheira de 3,0 para 6,0 unidades reduziu consideravelmente a relação fungos/bactérias no processo de decomposição da serapilheira de *Fagus sylvatica* L. e *Picea abies* L. (Blagodatskaya e Anderson, 1998). Essa mudança na população decompositora do material orgânico pode ser responsável por alterar a estequiometria C/S da serapilheira, resultando em maior acúmulo de S nos horizontes que receberam calcário.

As plantas de *P. taeda* L. do presente estudo depositaram acículas (horizonte Ln da serapilheira) com concentração média de  $1,6 \text{ g kg}^{-1}$  MS de Al (Figura 3.2F). Cerca de 3x o observado para as acículas de 1º lançamento (Figura 1B), indicando que há grande acúmulo de Al em acículas senescentes. Assim como na hipótese levantada, para um plantio de *P. sylvestris* com 60 anos de idade, cultivado em um Cambissolo Háplico na Bélgica (Gielen et al., 2016), esse acúmulo de Al em acículas senescentes pode se tratar de uma rota complementar para a eliminação de Al tóxico (Brunner e Sperisen, 2013).

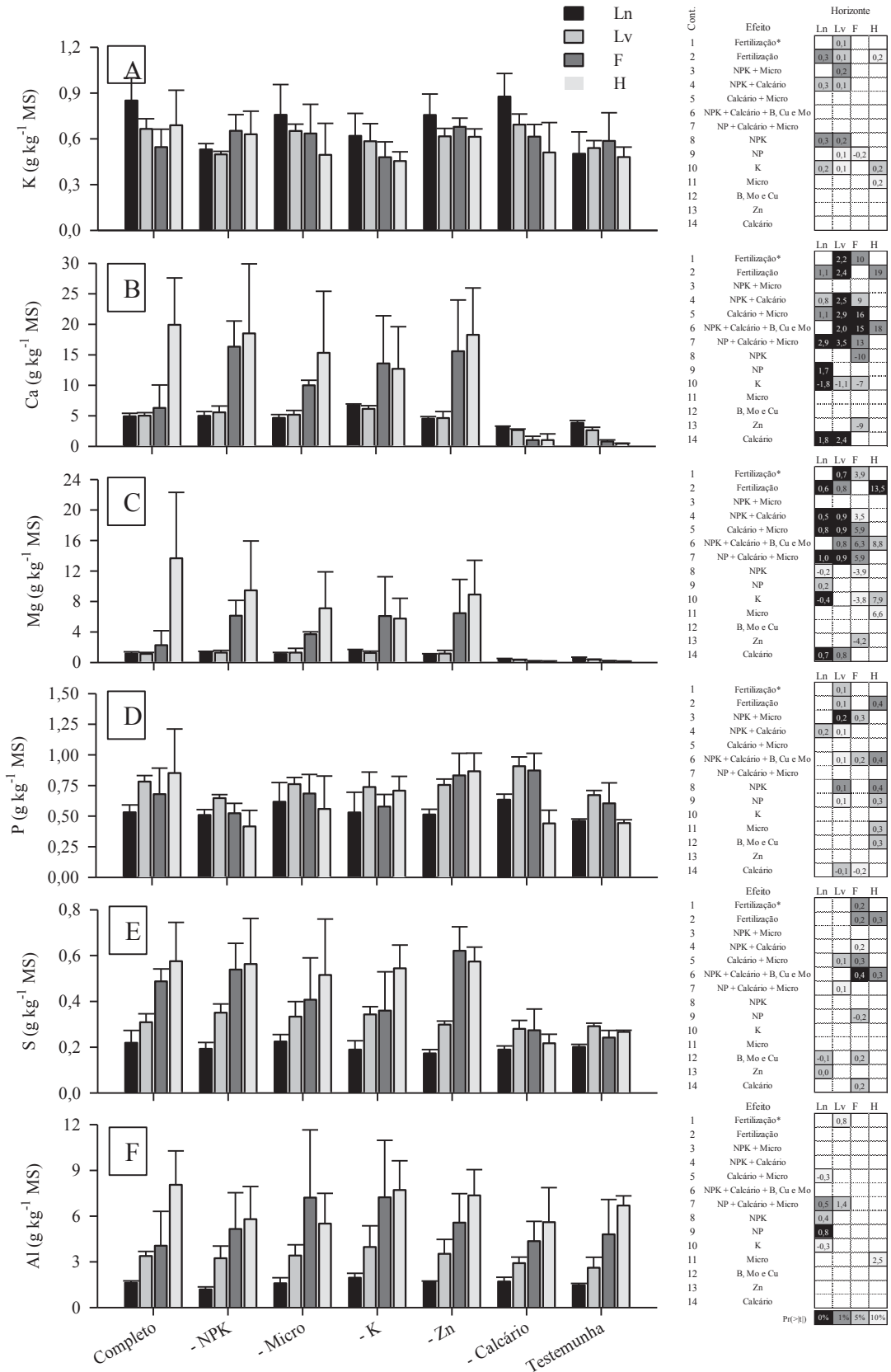
A concentração de Al nos horizontes aumenta junto com seu grau de humificação (no sentido Ln para Lh). O horizonte Lh ( $6,7 \text{ g kg}^{-1}$  MS de Al) é 320% mais concentrado do que o Ln (acícula depositada,  $1,6 \text{ g kg}^{-1}$  MS de Al). O Al apresenta de fato acúmulo em materiais orgânicos em decomposição, sendo comum a observação de aumento de Al com a humificação de horizontes orgânicos da serapilheira de essências florestais (Yanai et al., 2005; Goya et al., 2008; Jonczak, 2012). Outro processo que contribuiria para o aumento da concentração dos horizontes Lf e Lh seria a transferência de Al do solo para a serapilheira via micorrizas (Brandtberg e Simonsson, 2003). Não obstante, a própria transição solo/serapilheira não é absoluta, partículas de solo - que podem apresentar concentrações dezenas de vezes maiores do que a serapilheira -, podem se associar fortemente ao material orgânico humificado (Goya et al., 2008; Jonczak, 2012).

Também foi verificado, para o Al na serapilheira, interação entre o fornecimento de P na ausência de K. O fornecimento de NP resultou em horizontes Ln e Lv mais ricos em Al, entre  $0,4$  e  $0,8 \text{ g kg}^{-1}$  MS de Al mais concentrados do que



o tratamento testemunha. Houve resposta significativa negativa ao efeito de K e positiva ao efeito de NPK (Figura 3.1F, contrastes 5 e 10). O maior acúmulo de Al nas acículas senescentes, bem como de Mn, assim como o aumento observado para Zn em ambos lançamentos, ocorrendo no -K e não no Completo, também seriam resultado do efeito do tratamento -K nas raízes das plantas, assim como teorizado para o Zn.

FIGURA 3.2. Experimento de adubação com omissão de nutrientes em *P. taeda* L., realizado no polo florestal de Jaguariaíva/PR. Teores de macronutrientes e Al nos horizontes da serapilheira à esquerda. Os números dentro de cada célula, referentes a cada LH testada, se referem às diferenças, em valor absoluto, entre os tratamentos contrastantes.



A calagem contribuiu na conservação do B aplicado na serapilheira. Com exceção do tratamento -K, os demais que também continham B e calcário apresentaram os horizontes Lf e/ou Lh entre 8 e 10 mg kg<sup>-1</sup> MS mais concentrados do que na testemunha (Figura 3.3A, contrastes 2, 5 e 6). Os efeitos positivos do fornecimento de calcário e de B podem ser vistos pelos contrastes 11, 12 e 14 na figura 3.3A. A calagem em plantio estabelecido de *Picea abies* aumentou em 4x adsorção de B na fase orgânica de um solo podzólico, mesmo após 12 anos da aplicação (Lehto, 1995). Dessa forma, é compreensível a maior retenção do B aplicado em tratamentos que receberam calcário.

Presumivelmente a calagem aumentou a retenção de B na serapilheira (Lehto, 1995), que reduziu sua lixiviação, mas não sua biodisponibilidade, ou pelo menos a lixiviação em maior intensidade relativa. O que, aliado a elevada capacidade de absorção do nutriente pelas plantas (Sypert, 2006), fez com que a dose de 3 kg ha<sup>-1</sup> de um nutriente com baixa capacidade de adsorção como o B (Pavan e Correa, 1988; Goldberg et al., 1993) permanecesse parcialmente no sistema por sete anos.

Em contraste, Zn e Cu apresentam elevada capacidade de adsorção pela matéria orgânica, com elevado grau de energia (Sims, 1986; Pegoraro et al., 2006; Stanislawski-glubiak et al., 2014) especialmente o Cu (Gómez-Armesto et al., 2015). Tal fato justifica a maior concentração de Cu e Zn, nas frações parcialmente ou com alto grau de humificação, Lf e Lh (Figura 3.3B e 3.3C).

As concentrações de Zn e Cu, nos horizontes Lf e Lh, são valores impressionantes, entre 144 e 350 mg kg<sup>-1</sup> MS de Zn e entre 81 e 189 mg kg<sup>-1</sup> MS de Cu (Contrastes 1, 2, 3, 5, 6 e 7). Alta capacidade de tamponamento desses micronutrientes pela serapilheira foi previamente relatada por Xue et al. (2015). Os autores relatam que após aplicações consecutivas de um biosólido em plantio estabelecido de *P. radiata* as concentrações de Zn e Cu na serapilheira passam, respectivamente, de 32 e 10 para 75 e 35 mg kg<sup>-1</sup> MS. No presente estudo, para os horizontes superficiais (Ln e Lv), há acréscimos apenas na concentração de Zn, condizente com o observado para concentração nas acículas (Figura 3.1C).

O efeito negativo dos tratamentos que continham calcário na concentração de Mn nas acículas se refletiu nos horizontes superficiais da serapilheira, Ln e Lv (Figuras 3.1D e 3.3D, contrastes 1, 2, 4, 5, 6 e 7).

O material orgânico em humificação apresentou afinidade contrastante para o Mn em comparação com Fe e Al. Ao contrário do observado para o elemento Al e o micronutriente Fe, a concentração de Mn na serapilheira diminuiu com o aumento da decomposição (Figuras 3.2F, 3.3D e 3.3E), indicando perda de parte do Mn do material, via lavagem, ao longo do processo de humificação. No entanto, nos tratamentos com calcário o horizonte Lh apresentou, em média, 155 mg kg<sup>-1</sup> MS de Mn, enquanto a média dos tratamentos testemunha e -Calcário é de 33.5 mg kg<sup>-1</sup> MS de Mn. Para o horizonte Lf esses valores são de 308 e 35 mg kg<sup>-1</sup> MS de Mn (Figura 3.3D).

Um aumento de pH nos horizontes Lf e Lh da serapilheira, decorrente da calagem, seria responsável pelo aumento do número de sítios ativos na superfície do material orgânico em processo de humificação (Brandtberg e Simonsson, 2003; Pehlivan e Arslan, 2006), ao mesmo tempo que diminuiria a atividade de Fe e Al através da formação de compostos minerais de baixa solubilidade (Rowley et al., 2018) e aumentaria a complexação de Mn pelo material orgânico em humificação (Sims, 1986). Esses mecanismos explicariam por que a aplicação de calcário permitiu que maior quantidade de Mn permanecesse nos horizontes Lf e Lh durante o processo de humificação.

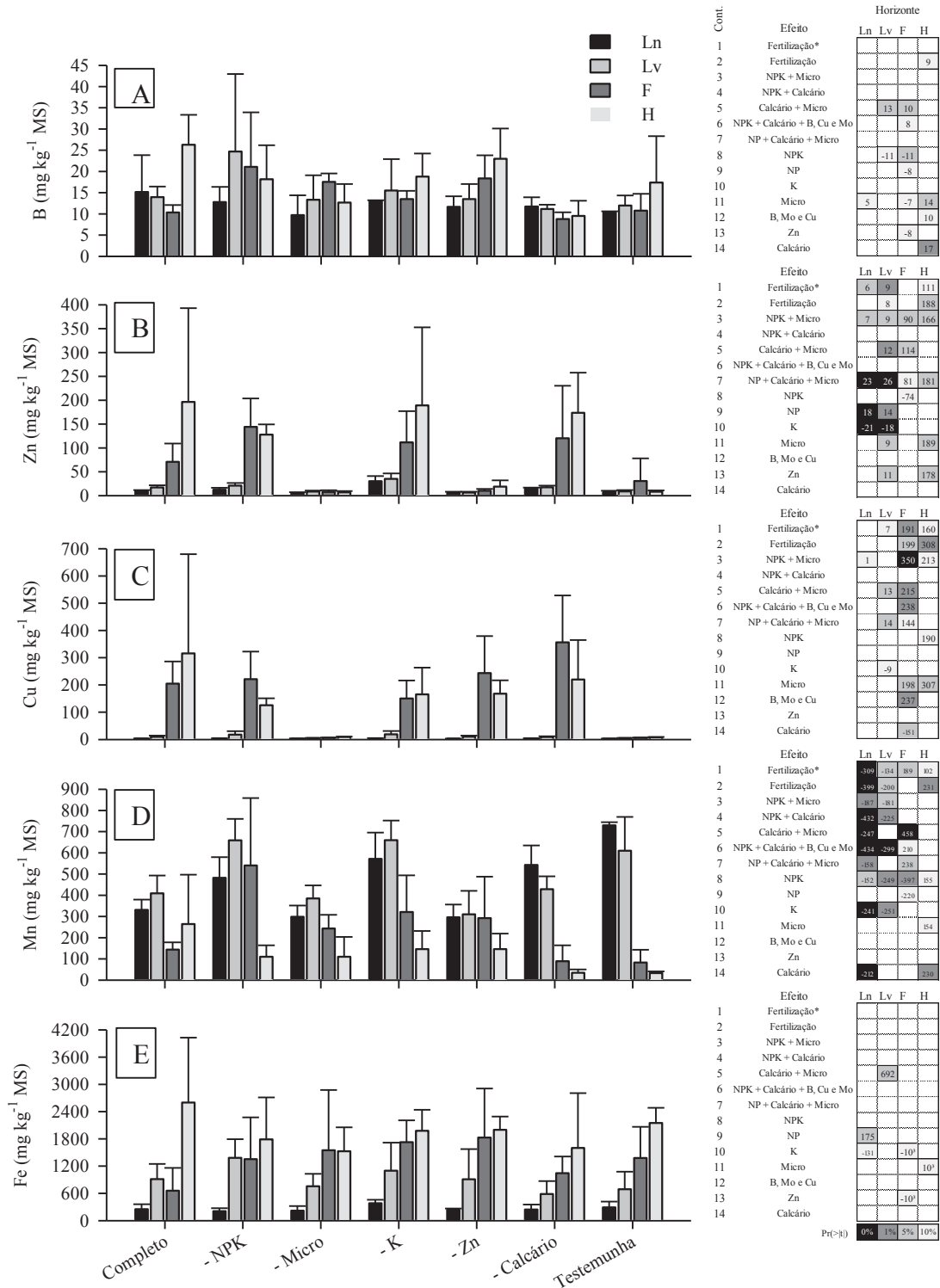
Conforme supracitado, o nutriente Fe apresentou a mesma dinâmica que o elemento Al, concentrando-se em razão do aumento do grau de humificação da serapilheira (Figura 3.3E). Os horizontes Ln e Lh apresentaram, em média, 0,26 e 2,0 g kg<sup>-1</sup> MS de Fe, o equivalente a 640% de aumento na concentração. O aumento da concentração de Fe e Al, bem como a liberação de Mn, acompanhando o processo de humificação de materiais orgânicos foi previamente reportado (Goya et al., 2008; Jonczak, 2012). Trevisan, (1992) constatou valores de 1679 e 31 mg kg<sup>-1</sup> de Mn para acícula recém caída e fração mais humificada da serapilheira, em um sítio de baixa produtividade, confirmando grande perda de Mn acompanhando o processo de decomposição.

Corroborando com os resultados aqui obtidos, Kerndorff e Schnitzer (1980) constataram que a o Mn é o elemento com menor força de adsorção entre os 11 elementos testados, entre os mesmos (Fe, Al, Cu, Zn) na fração húmica de um solo, independente do pH (pH 4,7 - Hg=Fe=Pb=Cu=Al=Cr > Cd > Ni=Zn > Co > Mn. pH 5.8 - Hg=Fe===Pb=Al=Cr=Cu > Cd > Zn > Ni > Co > Mn). Ainda, os autores verificaram que 96, 86, 59, 8 e 3 % do Fe, Al, Cu, Zn e Mn ficaram adsorvidos a no

ácido húmico do solo na concentração de 200 mg em pH 3,7, respectivamente. Já, os respectivos valores de 100, 100, 95, 29 e 13 % foram obtidos em pH 4,7, confirmando a influência do pH.

O maior aumento relativo de Fe (comparando o horizonte Ln com o Lh) em relação ao Al supostamente seja um sintoma da contaminação da base da serapilheira com partículas de solo associadas ao material orgânico em decomposição (Yanai et al., 2005; Goya et al., 2008; Jonczak, 2012), visto que o solo pode ser em torno de 25 vezes mais concentrado em Fe do que o horizonte Lh, e em torno de apenas 15 vezes para o Al (Mineropar, 2010). Ao mesmo tempo, a concentração de Fe do horizonte Lh é menos do que 1/3 do valor observado para o Al (Figuras 3.2F e 3.3E). Assim, independente da intensidade da contaminação da serapilheira com partículas de solo, o Fe sempre apresentaria o maior incremento relativo, em comparação ao Al.

FIGURA 3.3. Experimento de adubação com omissão de nutrientes em *P. taeda* L., realizado no polo florestal de Jaguariaíva/PR. Teores de micronutrientes nos horizontes da serapilheira à esquerda. Os números dentro de cada célula, referentes a cada LH testada, se referem as diferenças, em valor absoluto, entre os tratamentos contrastantes.



A serapilheira atua como agente tamponante dos nutrientes aplicados via fertilização. Mesmo após sete anos da fertilização, de uma forma geral, o conteúdo

de nutrientes na serapilheira variou em conformidade com a composição nutricional do tratamento aplicado (Figura 3.4).

Todavia, todos os tratamentos fertilizados resultaram em maior conteúdo de K do que o tratamento testemunha. Os tratamentos fertilizados (inclusive a omissão de K) continham em média 25 kg ha<sup>-1</sup> MS de K contra 14 kg ha<sup>-1</sup> de K no tratamento testemunha (Figura 3.4A).

Plantas de *P. taeda* L. possuem uma capacidade elevada para aquisição de K do solo (Alves et al., 2013), os autores sugerem que haja transferência contínua de K do solo para a serapilheira. Houve similaridade entre os tratamentos para os valores de concentração de K na serapilheira (Figura 3.2A). O conteúdo de K na serapilheira dos tratamentos fertilizados dependeu majoritariamente do maior acúmulo de serapilheira em tratamentos mais produtivos do que pelo fornecimento do K *per se*.

As plantas do tratamento -K até depositam acículas menos concentradas em K do que os tratamentos que receberam o nutriente, todavia a maior deposição e consequente acúmulo de serapilheira resultaria em maior transferência de K do solo para o ciclo geoquímico no sistema Pinus.

Os tratamentos com calcário continham, em média, 606 e 206 kg ha<sup>-1</sup> de Ca e Mg, respectivamente. Para os tratamentos -Calcário e testemunha esses valores foram de 43 e 7.6 kg ha<sup>-1</sup> de Ca e Mg, respectivamente (Figura 3.4B e 3.4C). Essa diferença indica que a maior parte do calcário aplicado permanece na serapilheira. A retenção eficiente de calcário pela serapilheira parece ser intrínseca desse meio, como barreira física ou química retendo os elementos por adsorção. O efeito físico pode ser observado visualmente com presença de frações mais grosseiras do calcário. Mesmo uma dose de calcário cerca de 2.5x a utilizada nesse presente estudo, capaz de aumentar as concentrações de Ca e Mg na serapilheira de *P. sylvestris* de 1,4 e 0,32 para 14 e 1 g kg<sup>-1</sup> MS, no solo apresentou apenas um pequeno efeito na camada de 0-10 cm, 3 anos após a aplicação (Marschner e Wilczynski, 1991).

Todos os tratamentos de fertilização apresentaram incremento, de 1 a 3 kg ha<sup>-1</sup> MS, no conteúdo de P no Lv (Figura 3.4D, contrastes 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7). Todavia, para o horizonte Lh, ou considerando toda a serapilheira, foram observados incrementos de 10 a 21 kg ha<sup>-1</sup> MS no conteúdo de P apenas onde esse nutriente foi fornecido (contrastos 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 e 9). Em outras palavras, mesmo após sete



anos da adubação até 40% do P aplicado permaneceu na serapilheira. Esse talvez seja o principal indicativo, no presente estudo, da reconhecida estabilidade do P no ambiente (Achat et al., 2016). A aplicação de até 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, sobre a serapilheira de plantio de *Pinus* estabelecido, possivelmente apresente riscos mínimos de desperdício do nutriente.

A capacidade de tamponamento de P dos horizontes em humificação da serapilheira (Lf e Lh) reside na adsorção de íons polivalentes, como Al, no material orgânico em decomposição, que em teoria pode resultar em carga líquida positiva, se caracterizando como um potencial sítio de adsorção do ânion fosfato (Stewart, 1989). Não obstante, certamente alguma parte do P liberado pela solubilização do fertilizante tenha precipitado com cátions metálicos como Fe e Al, formando compostos de alta estabilidade (Lindsay, 1979).

A aplicação de calcário em plantio estabelecido de *P. taeda* L. resultou em aumento considerável no conteúdo de S nos horizontes Lv e Lh (Figura 3.4E, contrastes 1, 2, 4, 5, 6 e 7). Os tratamentos com calcário continham, em média, 20,4 kg ha<sup>-1</sup> de S, enquanto os tratamentos –Calcário e testemunha continham 8,3 ± 1,4 kg ha<sup>-1</sup> de S. Uma possível causa do aumento da concentração, e consequente conteúdo, de S na serapilheira foi previamente apresentada e discutida no tópico concentração de nutrientes na serapilheira.

As concentrações de Fe e Al, nas acículas e nos horizontes da serapilheira, praticamente não se alteram entre os tratamentos (Figuras 3.1B, 3.1D, 3.2F e 3.3D). Assim, as diferenças entre os tratamentos, para os conteúdos desses dois elementos na serapilheira, certamente sejam reflexo do acúmulo de serapilheira. Dessa forma, novamente o tratamento –K merece destaque, apresentou incremento, em relação ao tratamento testemunha, de 224 e 51 kg ha<sup>-1</sup> de Al e Fe, respectivamente (Figura 3.4F e 3.4K, contraste 7). A carência de K promoveu senescência precoce de acículas de *P. pinaster* A. (Eimil-Fraga et al., 2015), o que no caso do presente estudo resultou diretamente em aumento de quantidade de serapilheira.

O Mn, ao contrário dos demais cátions metálicos (Fe, Al, Zn e Cu), se destaca por apresentar o conteúdo total melhor distribuído entre os quatro horizontes da serapilheira (Ln, Lv, Lf, Lh) (Figura 3.4J). Esse resultado é a consequência da perda de Mn da serapilheira durante o processo de humificação,

confirmando a menor adsorção de Mn na matéria orgânica em comparação com Fe, Al, Zn e Cu (Goya et al., 2008).

Esse processo é possibilitado pelos altos valores de Mn nas acículas senescentes das plantas avaliadas, horizonte Ln da serapilheira ( $513 \pm 216 \text{ mg kg}^{-1}$ ). É comum a ocorrência de altos valores de Mn em acículas e serapilheira de *P. taeda* L. (Schumacher et al., 2008; Viera e Schumacher, 2009, 2010a). Plantas de *Pinus* exsudam ácidos orgânicos pelas raízes a fim de solubilizar nutrientes para possibilitar a absorção (Clarholm et al., 2015), o Mn apresenta um grande potencial para aumento de mobilidade em decorrência da adição de resíduos orgânicos ao solo, por exemplo, mesmo em comparação com os demais cátions metálicos Cu, Fe e Zn (Pegoraro et al., 2006). Assim, possivelmente a adaptação das plantas de *P. taeda* L. aos altos valores de Mn nas acículas normalmente observados seja um efeito colateral da alta capacidade de aquisição de nutrientes pelas plantas (exsudação de ácidos orgânicos favoreceriam sobremaneira a absorção de Mn). Da mesma forma, a absorção de Mn também do solo contribuiria para a deposição de acículas cada vez mais concentradas, resultando em fenômeno cíclico de auto toxidez de Mn.

Mesmo um nutriente móvel no ambiente como o B (SBCS, 2007) foi capaz de persistir parcialmente no sistema após sete anos de aplicação. Todavia, a aplicação conjunta de calcário foi providencial para essa manutenção do B aplicado (Figura 3.4G). Nos tratamentos que incluíram calcário e B (Completo, -NPK, -K e -Zn) cerca de 11% do B aplicado permaneceu na serapilheira. Esses tratamentos continham, em média,  $817 \text{ g ha}^{-1}$  de B, enquanto nos demais (-Micro, -Calcário e testemunha), o conteúdo de B na serapilheira foi de  $479 \pm 72 \text{ g ha}^{-1}$  de B (Figura 3.4G, contrastes 1, 2, 5, 6 e 7). A possível causa para esse efeito foi discutida no item concentração de micronutrientes na serapilheira.

Diferentemente do B, os conteúdos de Zn e Cu na serapilheira indicam que a mesma reteve eficientemente esses dois micronutrientes aplicados nos horizontes Lf e Lh (Figura 3.4H e 3.4I). Os horizontes Lf e Lh da serapilheira possivelmente possuem potencial para acúmulo de metais de uma forma geral, graças a suas características físico-químicas adquiridas pelo maior grau de humificação, que proporciona maior quantidade de sítios ativos (Merritt e Erich, 2003). As autoras também relatam que o aumento da humificação de material orgânico (palha de trigo) aumenta a capacidade de adsorção de Cu do material. Os tratamentos que

receberam esses nutrientes apresentaram, em média, 6,75 e 5,0 kg ha<sup>-1</sup> de Zn e Cu na serapilheira a mais do que os tratamentos que não receberam esses micronutrientes. Mesmo no ambiente solo, onde normalmente as concentrações desses micronutrientes são mantidas graças ao equilíbrio com a fase sólida majoritariamente através de ligações covalentes de alta energia (formação de complexos de esfera interna), a adição de material orgânico diminui consideravelmente a atividade dos íons livres de Zn e Cu através da formação de complexos organometálicos (Hernandez-Soriano et al., 2013; Stanislawska-glubiak et al., 2014).



Ao contrário das acículas, as poucas diferenças entre os tratamentos observadas para concentração de K nas raízes da serapilheira (Figura 3.5A) não estão relacionadas com o fornecimento de K *per se*. A concentração de K nas raízes aumentaram entre 0,6 e 0., g kg<sup>-1</sup> MS pela presença de calcário e/ou Zn nos tratamentos (Figura 3.5A, contrastes 2, 4, 5, 8, 9, 11, 13 e 14). A concentração de K segue a ordem acícula>raízes da serapilheira>serapilheira.

De fato, como citado anteriormente, a disponibilidade de K pode induzir a ocorrência de sintoma visual de carência de Mg na parte aérea em *P. radiata* (Sun e Payn, 1999), ao mesmo tempo em *P. pinaster* foi verificado que K e Mg apresentam distribuição semelhante entre os órgãos da planta (Gielen et al., 2016). Nesse sentido, é possível que o potencial efeito negativo exercido pela alta pressão de Mg, nos tratamentos que receberam calcário, na absorção de K pelas raízes tenha sido compensado pela reconhecida mobilidade de K no floema (Marschner, 2012). O efeito competitivo Mg-K se manifesta nos dois sentidos. Plantas que receberam K apresentaram concentrações de K nas acículas de ambos os lançamentos maiores do que plantas que receberam K e Mg, e vice-versa (Figura 3.1A, contrastes 10 e 11).

O efeito do calcário aplicado na concentração de Ca e Mg nas raízes da serapilheira é elevado (Figura 3.5B e 3.5D, contrastes 1, 2, 4, 5, 6 e 7). As raízes das plantas de *P. taeda* L. que receberam calcário ostentam uma concentração média de Ca na ordem de  $7.9 \pm 2$  g kg<sup>-1</sup> DM, enquanto as demais apresentam  $1,28 \pm 0,17$  g kg<sup>-1</sup> MS de Ca. Para o Mg esses valores são de  $2,7 \pm 1$  e  $0,23 \pm 0,05$  g kg<sup>-1</sup> MS (Figura 3.5B e 3.5C).

Nos tratamentos –Calcário e Testemunha a ordem nas concentrações de Ca é Ln>Lv>Ac. de primeiro lançamento>Ac. de segundo lançamento>Raízes do Lf = Raízes do Lh> Lf >Lh. Para os tratamentos que continham calcário a ordem seria Lh>Lf>Raízes do Lh>Raízes do Lf>Lv=Ln>>Ac. do primeiro lançamento>Ac. do segundo lançamneto. Em outras palavras, ao contrário do K, a serapilheira humificada (Horizontes Lf e Lh) apresentou os acréscimos mais acentuados de Ca e Mg, seguida das raízes na serapilheira e por último as acículas. Os maiores teores de Ca e Mg nas raízes do Lh em relação as raízes do Lf (para os tratamentos que receberam calcário) seguem o maior acúmulo dos nutrientes no Lh em relação ao Lf, caracterizando efeito filtro para Ca e Mg nas raízes da serapilheira de *P. taeda* L.

Folhas de uva (*Vitis vinifera* L. cv. Chardonnay) apresentaram acúmulo de entre 4 e 8,5 g kg<sup>-1</sup> MS de Ca apenas na parede celular (Tan et al., 2017). É possível que a parede celular também atue como dreno do excesso de Ca e Mg nos tecidos radiculares das plantas de *P. taeda* L. do presente estudo.

A concentração de P apresentou poucas respostas em alguns efeitos que testam o fornecimento também de P, os incrementos ficaram entre 0,220 e 0,378 g kg<sup>-1</sup> MS de P (Figura 3.5D, contrastes 3, 7 e 8). As plantas do tratamento testemunha apresentaram concentrações de P semelhantes ao 0,5 g kg<sup>-1</sup> MS observado em raízes finas de *P. pinaster* A. se desenvolvendo em solo ácido e muito pobre em nutrientes (Augusto et al., 2015). Os acréscimos na concentração P nas raízes de *P. taeda* L. que colonizam a serapilheira, no presente estudo, representam entre 40 e 70% dos valores no tratamento testemunha. Possivelmente os valores de concentração de P nas raízes, dos horizontes Lf e Lh, das plantas submetidas a adubação fosfatada (0,68 e 0,59 g kg<sup>-1</sup> MS) servem de indicativo de disponibilidade suficiente de P para *P. taeda* L.

A fertilização resultou em acréscimo médio de 0,16 e 0,13 g kg<sup>-1</sup> MS de S nas raízes dos horizontes Lf e Lh, respectivamente (Figura 3.5E, contraste 1). Os tratamentos –Calcário e testemunha resultaram em raízes da serapilheira com 0,29 e 0,25 g kg<sup>-1</sup> MS de S, nos horizontes Lf e Lh, respectivamente. Para os demais tratamentos as médias foram de 0,45 e 0,41 g kg<sup>-1</sup> MS de S.

Os acréscimos na concentração de S nas raízes da serapilheira dos tratamentos que continuam calcário são condizentes como acúmulo de S nos horizontes Lf e Lh da serapilheira desses tratamentos (conforme discutido anteriormente), possivelmente houve aumento da disponibilidade desse nutriente para as raízes das plantas de *P. taeda* L.

A raízes de *P. taeda* L. que colonizavam os horizontes Lf e Lh da serapilheira continuam, em média, 2,43 ± 0,5 e 2,94 ± 0,3 g kg<sup>-1</sup> MS de Al (Figura 3.5F). Os mecanismos de resistência à altas pressões de Al<sup>3+</sup> por plantas lenhosas foram amplamente estudados. Envolvem principalmente manutenção de Al no apoplasto (ligado aos sítios de carga negativa da pectina na parede celular) e, no citossol; quelação, sequestro de Al em compartimentos celulares e ativação de rotas metabólicas tolerantes ao Al (Brunner e Sperisen, 2013). Os valores de concentração de Al nas raízes estão bem acima das médias de 0,64, 0,43 e 1,6 g kg<sup>-1</sup> MS de Al nas acículas de 1º e 2º lançamentos e senescentes (Ln),

respectivamente. No entanto, os valores de concentração de Al nas acículas ainda suportam a ideia de que o *P. taeda* L., assim como o *P. sylvestris*, apresenta o acúmulo de Al nas acículas senescentes como rota complementar para eliminação do Al tóxico (Gielen et al., 2016).

Todavia, apesar do calcário aplicado, as raízes em ambos horizontes apresentam concentração de Al equivalente à 44% do valor observado para o horizonte em questão. Apesar da aplicação de calcário não exercer influência relevante na concentração de Al nas acículas (Figura 3.1B), horizontes orgânicos da serapilheira (Figura 3.2F) ou raízes (Figura 3.5F), a relação molar Ca/Al nas raízes dos horizontes Lf e Lh passaram de  $0,28 \pm 0,02$  para  $1,93 \pm 0,03$  (dados não apresentados) com a aplicação de calcário. A relação molar Ca/Al em raízes finas é um adequado indicador da toxidez por Al (Vanguelova et al., 2007), os autores reportam que o valor generalista de 0,2 representa 90% de chance de não ocorrer efeito negativo do Al nas raízes ou na parte aérea. Por outro lado, plantas de *P. sylvestris* com 40 anos apresentaram maior taxa de raízes mortas quando a relação molar Ca/Mg nas raízes oscilou entre 0.24 e 0.67 (Vanguelova et al., 2005). Dessa forma, é possível que a aplicação de calcário no presente experimento tenha aliviado o estresse por Al em raízes da serapilheira.

A concentração de B nos compartimentos do plantio seguem a ordem: raízes da serapilheira > serapilheira > acículas. Mesmo apresentando as maiores concentrações, não houve efeito dos tratamentos nas concentrações de B nas raízes da serapilheira. Nos horizontes Lf e Lh, as raízes de *P. taeda* L. continham, em média, 25 e 35 mg kg MS de B (Figura 3.5G).

As plantas que foram fertilizadas com Zn e/ou Cu acumularam grandes quantidades desses nutrientes nas raízes da serapilheira, em valores próximos a 100 mg kg MS. Apesar dos incrementos médios na ordem de 500 e 1500% nos valores de concentração de Zn e Cu nas raízes de *P. taeda* L. na serapilheira, em resposta a adubação (Figura 3.5H e 3.5I), os valores finais ainda são baixos com relação ao potencial do gênero. Raízes de *P. sylvestris* com cinco anos, crescendo em solo contaminado na Polônia, apresentaram concentração média de aproximadamente  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$  DM de Zn nas raízes (Gobelak et al., 2016).

Ambos micronutrientes Zn e Cu apresentaram grande efeito nos horizontes Lf e Lh da serapilheira (Acumulação do nutriente aplicado) e um efeito um pouco menos pronunciado nas raízes da serapilheira (Figuras 3.3B, 3.3C, 3.5H e 3.5I).



Todavia apenas o Zn apresentou acréscimo nas acículas em decorrência da aplicação (Figura 3.1C). A contaminação do solo normalmente resulta em acúmulo de metais pesados nas raízes (Nguyen et al., 2017), confirmando o efeito filtro de metais do sistema radicular de uma forma geral.

Para o horizonte Lf, houve acréscimo de Mn no tecido radicular nos tratamentos que receberam calcário e Zn (Figura 3.5J, contrastes 1, 5 e 7). Por outro lado, para as raízes do horizonte Lh o calcário aplicado foi responsável pela redução da concentração de Mn, todavia, não houve redução quando conjuntamente com o calcário foi aplicado NP e Zn (Figura 3.5J, contrastes 1, 2, 4, 5, 6 e 7). A maior concentração de Ca e Mg no horizonte Lh possivelmente explique essa diferença. Presume-se que a maior retenção de calcário, com maior aumento de pH, nesse horizonte seja responsável pela diminuição da disponibilidade de Mn (Lindsay, 1979; Bravo et al., 2017; Rosas-Patiño et al., 2017).

O único efeito significativo para concentração de Fe nas raízes da serapilheira foi a redução de mais de 50% da concentração desse nutriente nas raízes do horizonte Lh, em razão da omissão de Zn (Figura 3.5K, contraste 6).



#### 4.6 CONCLUSÕES

A serapilheira apresenta um papel chave na ciclagem de nutrientes em plantio estabelecido de pinus e a fertilização superficial é eficiente em disponibilizar os nutrientes para as plantas. Os teores nutricionais das acículas permitem inferir que o cultivo de *P. taeda* L. em Arapoti/PR apresenta como limitação as carências de Ca, Mg e Zn, bem como possivelmente a toxidez por Mn. As raízes da serapilheira de *P. taeda* L. retém nutrientes em disponibilidade excessiva, como Ca, Mg, Zn e Cu. Aparentemente não há consumo de luxo de nutrientes por plantas de *P. taeda* L. fertilizadas.

Os horizontes superficiais da serapilheira de plantio estabelecido de *P. taeda* L. em Arapoti/PR (Ln e Lv) apresentam composição nutricional dependente majoritariamente das acículas depositadas. Todavia, confirma-se o acúmulo de Fe e Al e a perda de Mn ao longo do processo de humificação da serapilheira. Os horizontes mais humificados da serapilheira (F e H), graças as suas características físico-químicas, retém nutrientes, a ordem de eficiência nesse sentido seria Cu>Ca>Mg>Zn>P. Por fim, também concluímos que a calagem em plantio estabelecido de *P. taeda* L. possui potencial para afetar os ciclos biogeoquímicos de S e Mn do ecossistema florestal, mesmo sem a adição desses elementos/nutrientes.

## 4.7 REFERÊNCIAS

- ACHAT, D. L., POUSSE, N., NICOLAS, M., BRÉDOIRE, F., AUGUSTO, L. Soil properties controlling inorganic phosphorus availability: general results from a national forest network and a global compilation of the literature. **Biogeochemistry**. v.127. p.255–272. 2016.
- ALBAUGH, T. J., ALLEN, H. L., FOX, T. R. Nutrient use and uptake in *Pinus taeda*. **Tree Physiology**. v.28. p.1083–1098. 2008.
- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., DE MORAES, GONÇALVES, J. L., SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**.v. 22. p.711–728. 2013.
- ALVES, M. J. F., MELO, V. DE F., REISSMANN, C. B., KASEKER, J. F. Reserva mineral de potássio em latossolo cultivado com *Pinus taeda* L. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**.v. 37. p.1599–1610. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. **Anuário Estatístico ABRAF 2013: Ano Base 2012**. Brasília; 2013.
- AUGUSTO, L., ACHAT, D. L., BAKKER, M. R., BERNIER, F., BERT, D., DANJON, F., & TRICHET, P. Biomass and nutrients in tree root systems–sustainable harvesting of an intensively managed *Pinus pinaster* (Ait.) planted forest. **Gcb Bioenergy**, v.7(2). p. 231-243. 2015.
- BAKKER, M. R., JOLICOEUR, E., TRICHET, P., AUGUSTO, L., PLASSARD, C., GUINBERTEAU, J., LOUSTAU, D. Adaptation of fine roots to annual fertilization and irrigation in a 13-year-old *Pinus pinaster* stand. **Tree Physiology**. v. 29. p. 229–238. 2009.
- BATISTA, A. H., MOTTA, A. C. V. , REISSMANN, C. B., *et al* () Liming and fertilisation in *Pinus taeda* plantations with severe nutrient deficiency in savanna soils. **Acta Scientiarum. Agronomy**. v. 37 p.117–125. 2015. DOI: 10.4025/actasciagron.v37i1.18061
- BEKELE, A., HUDNALL, W. H., TIARKS, A. E. Response of Densely Stocked Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.) to applied Nitrogen and Phosphorus. **Southern Journal of Applied Forestry**. v. 27. p. 180–189. 2003.
- BLAGODATSKAYA, E. V., ANDERSON, T. H. Interactive effects of pH and substrate quality on the fungal-to-bacterial ratio and QCO<sub>2</sub> of microbial communities in forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 30. p. 1269–1274. 1998.
- BRANDTBERG, P. O., SIMONSSON, M. Aluminum and Iron Chemistry in the O Horizon Changed by a Shift in Tree Species Composition. **Biogeochemistry**. v. 63. p. 207–228. 2003.
- BRAVO, S., AMORÓS, J. A., PÉREZ-DE-LOS-REYES, C., GARCÍA, F. J., MORENO, M. M., SÁNCHEZ-ORMEÑO, M., HIGUERAS, P. Influence of the soil pH

in the uptake and bioaccumulation of heavy metals (Fe, Zn, Cu, Pb and Mn) and other elements (Ca, K, Al, Sr and Ba) in vine leaves, Castilla-La Mancha (Spain). **Journal of Geochemical Exploration**. v. 174. p. 79–83. 2017.

BRUNNER, I., SPERISEN, C. Aluminum exclusion and aluminum tolerance in woody plants. **Frontiers in Plant Science**. v.4. p.1–12. 2013. DOI: 10.3389/fpls.2013.00172

CHAVES, R. DE Q., CORRÊA, G. F. Micronutrients in the soil - *Pinus caribaea* Morelet system with yellowing of the needles followed by senescence and death. **Revista Árvore**. v. 27. p. 769–778. 2003.

CHAVES, R. DE Q., CORRÊA, G. F. Macronutrients in the soil - *Pinus caribaea* Morelet system with yellowing of the needles followed by senescence and death. **Revista Árvore**. v. 29. p. 691–700. 2005.

CHEN, L., MU, X., YUAN, Z., DENG, Q., CHEN, Y., YUAN, L. Y., RYAN, L. T., KALLENBACH, R. L. Soil nutrients and water affect the age-related fine root biomass but not production in two plantation forests on the Loess Plateau, China. **Journal of Arid Environments**. v.135. p.173–180. 2016.

CLARHOLM, M., SKYLLBERG, U., ROSLING, A. Soil Biology & Biochemistry Organic acid induced release of nutrients from metal-stabilized soil organic matter e The unbutton model. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 84. p. 168–176. 2015.

EIMIL-FRAGA, C., SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, F., ÁLVAREZ-RODRÍGUEZ, E., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. Variability in needle lifespan and foliar biomass along a gradient of soil fertility in maritime pine plantations on acid soils rich in organic matter. **Forest Ecology and Management**. v. 343. p.34–41. 2015.

FOX, T., ALLEN, H., ALBAUGH, T. Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the southern United States. **Southern Journal of Applied Forestry**. v. 31. p. 5–11. 2007a.

FOX, T. R., JOKELA, E. J., ALLEN, H. L. The Development of Pine Plantation Silviculture in the Southern United States. **Journal of Forestry**. v.105. p. 337–347. 2007b.

GIELEN, S., BATLLE, J. V., VINCKE, C., VAN HEES, M., VANDENHOVE, H. Concentrations and distributions of Al, Ca, Cl, K, Mg and Mn in a Scots pine forest in Belgium. **Ecological Modelling**. v. 324. p. 1–10. 2016.

GOLDBERG, S., FORSTER, H. S., HEICK, E. L. Boron adsorption mechanisms on oxides, clay minerals and soils inferred from ionic strength effects. **Soil Science Society of America Journal**. v.57. p. 704–708. 1993.

GÓMEZ-ARMESTO, A., et al. Copper content and distribution in vineyard soils from Betanzos (A Coruña, Spain). **Spanish Journal of Soil Science**. v.5. p. 60–71. 2015.

GOYA, J. F., FRANGI, J. L., TEA, F. D. Decomposition and nutrient release from leaf litter in *Eucalyptus grandis* plantations on three different soils in Entre Ríos, Argentina. **Ecology**. v. 29. p. 217–226. 2008.

GROBELAK, A., PLACEK, A., GROSSER, A., SINGH, B. R., ALMÁS, Á. R., NAPORA, A., KACPRZAK, M. Effects of single sewage sludge application on soil phytoremediation. **Journal of Cleaner Production**. v.155. p.189–197. 2016.

HERNANDEZ-SORIANO, M. C., PEÑA, A., MINGORANCE, M. D. Soluble metal pool as affected by soil addition with organic inputs. **Environmental Toxicology and Chemistry**. v. 32. p.1027–1032. 2013.

JONCZAK, J. Effect of land use on the carbon and nitrogen forms in humic horizons of Stagnic Luvisols. **Leone Prace Badawcze**. v. 73. p.143–151. 2012.

KERNDORFF, H., SCHNITZER, M. Sorption of metals on humic acid. **Geochimica et Cosmochimica Acta**. v. 44. p. 1701–1708.1980.

LEHTO, T. Boron retention in limed forest mor. **Forest Ecology and Management**. v. 78. p. 11–20. 1995.

LINDSAY, W. L. **Chemical equilibria in soils**. Wilard. New York: John Wiley & Sons; 1979.

LONDERO, E. K., SCHUMACHER, M. V., SZYMCZAK, D. A., VIERA, M. Exportação e reposição nutricional no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L. em área de segunda rotação. **Ciência Florestal**. v. 21. p. 487–497. 2011.

LOPES, A. S., COX, F. R. A Survey of the Fertility Status of Surface Soils Under “Cerrado” Vegetation in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**. v. 41. p. 742–747. 1977.

LOPES, V. G., SCHUMACHER, M. V., MÜLLER, I., CALIL, F. N., WITSCHORECK, R., LIBERALESSO, E. Physical and chemical soil variables affecting *Pinus taeda* L. fine roots distribution in northeast of Rio Grande do Sul, Brazil. **Ecologia e Nutrição Florestal**. v.1. p. 14–23. 2013.

LOPEZ-ESCOBAR, N. F., et al. Reservoirs and nutrient dynamics in two stands of *Pinus montezumae* Lamb. in Tlaxcala, Mexico. **Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**. v. 24. p. 115–129. 2017.

MAGGARD, A. O., WILL, R. E., WILSON, D. S., MEEK, C. R., VOGEL, J. G. Fertilization reduced stomatal conductance but not photosynthesis of *Pinus taeda* which compensated for lower water availability in regards to growth. **Forest Ecology and Management**. v. 381. p.37–47. 2016.

MAGGARD, A. O., WILL, R. E., WILSON, D. S., MEEK, C. R., VOGEL, J. G. Fertilization can compensate for decreased water availability by increasing the efficiency of stem volume production per unit of leaf area for loblolly pine (*Pinus taeda*) stands. **Canadian Journal of Forest Research**. v. 47. p. 445–457. 2017.

MARSCHNER, B., WILCZYNSKI, A. W. The effect of liming on quantity and chemical composition of soil organic matter in a pine forest in Berlin, Germany. **Plant and Soil**. v. 137. p. 229–236. 1991.

MARSCHNER, H. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants** [Internet]. 3a. Marschner P, organizador. Sch. Agric. Food Wine, Univ. Adelaide/Australia. London: Elsevier Ltd; 2012.

MARTINS, A. P. L., REISSMANN, C. B. Material Vegetal e as Rotinas Laboratoriais nos Procedimentos Químico-Analíticos. **Scientia**. v. 8. p. 1–17. 2007.

MEIER, I. C., FINZI, A. C., PHILLIPS, R. P. Root exudates increase N availability by stimulating microbial turnover of fast-cycling N pools. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 106. p. 119–128. 2017.

MERRITT, K. A., ERICH, M. S. Influence of organic matter decomposition on soluble carbon and its copper-binding capacity. **Journal of environmental quality**. v. 32. p. 2122–2131. 2003.

MINEROPAR. **Mapa Geológico do estado do Paraná: Unidades Estratigráficas** [Internet]. p. 21–22. 2010.

MOTTA, A. C. V., BARBOSA, J. Z., CONSALTER, R., REISSMANN, C. B. Nutrição e Adubação da Cultura de Pínus. In: Prado R de M, Wadt PGS (eds) **Nutrição e adubação de espécies florestais e palmeiras**, 1st edn. FUNEP, Jaboticabal, pp 383–426. 2014.

NGUYEN, T. X. T., AMYOT, M., LABRECQUE, M. Differential effects of plant root systems on nickel, copper and silver bioavailability in contaminated soil. **Chemosphere**. v. 168. p. 131–138. 2017.

PAVAN, M. A., CORREA, A. E. Reações de equilíbrio solo-boro. **Pesquisa agropecuária brasileira**. v. 23. p. 261–269. 1988.

PEGORARO, R. F., DA SILVA, I. R., et al. Fluxo difusivo e biodisponibilidade de zinco, cobre, ferro e manganês no solo: Influência da calagem, textura do solo e resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**. v. 30. p.859–868. 2006.

PEHLIVAN, E., ARSLAN, G. Uptake of metal ions on humic acids. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**. v. 28. p. 1099–1112. 2006.

PEUKE, A. D., JESCHKE, W. D., HARTUNG, W. Flows of elements, ions and abscisic acid in *Ricinus communis* and site of nitrate reduction under potassium limitation. **Journal of Experimental Botany**. v. 53. p. 241-50. 2002.

PIOVESAN, G., SCHUMACHER, M. V., VIERA, M., LOPES, V. G., WELTER, C. Deposição de serapilheira em povoamento de Pinus. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v. 42. p. 206–2011. 2012.



RAMOS, S. J., FAQUIN, V., FERREIRA, R. M. A., JANICE, J. L. A., DE CARVALHO, G. Crescimento e teores de boro em plantas de eucalipto (*Eucalyptus citriodora*) cultivadas em dois Latossolos sob influência de doses de boro e disponibilidade de água. **Revista Árvore**. v. 33. p. 57–65. 2009.

REISSMANN, C. B., WISNIEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de Pinus. In: GONÇALVES, J. L. M. BENEDETTI, V., organizador. **Nutrição e fertilização florestal**. 3º ed Piracicaba: IPEF. p. 135–166. 2015.

REISSMAN, C. B., ZÖTTL, H. W. Problemas nutricionais em povoamentos de *Pinus taeda* em áreas do arenito da formação Rio Bonito-Grupo Guatá. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**. p. 75–80. 1987.

REVELLE, W. **Procedures for Personality and Psychological Research** [Internet]. Evanston, Illinois: Northwestern University; 2017.

ROSAS-PATIÑO, G., PUENTES-PÁRAMO, Y. J., MENJIVAR-FLORES, J. C. Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. **Corpoica Ciência e Tecnologia Agropecuaria**. v. 18. p. 529–541. 2017.

ROSOLEM, C. A., MATEUS, G. P., GODOY, L. J. G., FELTRAN, J. C., BRANCALIÃO, S. R. Morfologia radicular e suprimento de potássio às raízes de milho de acordo com a disponibilidade de água e potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 27. p. 875–884. 2003.

ROWLEY, M. C., GRAND, S., VERRECCHIA, É. P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. **Biogeochemistry**. v. 137. p. 27–49. 2018.

SARDANS, J., ALONSO, R., et al. Foliar and soil concentrations and stoichiometry of nitrogen and phosphorous across European *Pinus sylvestris* forests: Relationships with climate, N deposition and tree growth. **Functional Ecology**. v. 30. p. 676–689. 2016.

SCHUMACHER, M. V., VIERA, M., WITSCHORECK, R. Litter production and nutrients transfer in a second rotation area with *Pinus taeda* L. forest in Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**. v. 18. p. 471–480. 2008.

SHEPARD, J. P., MITCHELL, M. J. Nutrient cycling in a red pine plantation thirty-nine years after potassium fertilization. **Soil Science Society of America Journal**. v. 54. p. 1433–1440. 1990.

SIMS, T. Soil pH effects on the distribution and plant availability of manganese, copper, and zinc. **Soil Science Society of America Journal**. v. 50. p. 367–373. 1986.

SIXEL, R. M. DE M., ARTHUR JUNIOR, J. C., et al. Sustainability of wood productivity of *Pinus taeda* based on nutrient export and stocks in the biomass and in the soil. **Brazilian Journal of Soil Science**. p. 1416–1427. 2015.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO - SBCS. **Fertilidade do Solo**. Editores. 1a. Editores, Novais RF, Víctor Hugo Alvarez V., Nairam Félix de Barros, Renildes Lúcio F. Fontes RBCJCL, organizadores. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007.

STANISLAWSKA-GLUBIAK, E., KORZENIOWSKA, J., KOCON, A. Effect of peat on the accumulation and translocation of heavy metals by maize grown in contaminated soils. **Environmental Science Pollution Research**. v. 2. p. 4706-4714. 2014. doi: 10.1007/s11356-014-3706-x

STEWART, B. A. **Advances in Soil Science** [Internet]. LAL, J. L. H. R., ROSE, C. W., SCHWERTMANN, U., STEWART, B. A., TINKER, P. B., WAGENET, R., VARON, B., organizadores. New York: Springer-Verlag; 1989.

SUN, O. J., PAYN, T. I. M. W. Magnesium nutrition and photosynthesis in *Pinus radiata*: clonal variation and influence of potassium. **Tree physiology**. v. 19. p. 535–540. 1999.

SYPERT, R. H. **Diagnosis of Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.) Nutrient Deficiencies by Foliar Methods**. Virginia Polytechnic Institute and State University; 2006.

TAN, W., LIANG, T., DU, Y., ZHAI, H. The distribution and species of Ca<sup>2+</sup> and subcellular localization of Ca<sup>2+</sup> and Ca<sup>2+</sup>-ATPase in grape leaves of plants treated with fluoroglycofen. **Pesticide Biochemistry and Physiology**. v. 143. p. 207–213. 2017.

TREVISAN, E. **Classificação e Caracterização de Horizontes Orgânicos sob Povoamentos de *Pinus taeda* L na Região de Ponta Grossa - PR** -. Universidade Federal do Paraná. 1992.

VANGUELOVA, E. I., HIRANO, Y., et al. Tree fine root Ca/Al molar ratio - Indicator of Al and acidity stress. **Plant Biosystems**. v. 141. p. 460–480. 2007.

VANGUELOVA, E. I., NORTCLIFF, S., MOFFAT, A. J., KENNEDY, F. Morphology, biomass and nutrient status of fine roots of Scots pine (*Pinus sylvestris*) as influenced by seasonal fluctuations in soil moisture and soil solution chemistry. **Plant and Soil**. v. 270. p. 233–247. 2005.

VIERA, M., SCHUMACHER, M. V. Concentração e retranslocação de nutrientes em acículas de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**. v. 19. p. 375–382. 2009.

VIERA, M., SCHUMACHER, M. V. Teores e aporte de nutrientes na serapilheira de *Pinus taeda* L., e sua relação com a temperatura do ar e pluviosidade. **Revista Árvore**. v. 34. p. 85–94. 2010a. doi: 10.1590/S0100-67622010000100010

VIERA, M., SCHUMACHER, M. V. Monthly variation of litter deposition in *Pinus taeda* L. stand in native grass area in Cambará do Sul-RS. **Revista Árvore**. v. 34. p. 487–494. 2010b.

- WANG, L., KATZENSTEINER, K., SCHUME, H., VAN LOO, M., GODBOLD, D. L. Potassium fertilization affects the distribution of fine roots but does not change ectomycorrhizal community structure. **Annals of Forest Science**. v. 73. p. 691–702. 2016.
- WILKS, P., MANAGER, N., OLSEN, P. **The Rabbit Island Biosolids Project**. v. 54. p. 33–36. 2009.
- XUE, J., KIMBERLEY, M. O., et al. Ecological impacts of long-term application of biosolids to a radiata pine plantation. **Science of the Total Environment**. v. 531. p. 233–240. 2015.
- Yanai RD, Phillips RP, Arthur MA, Siccama TG, Hane EN. Spatial and temporal variation in calcium and aluminum in northern hardwood forest floors. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2005;160:109–118.
- ZADWORNÝ, M., MCCORMACK, M. L., MUCHA, J., REICH, P. B., OLEKSYN, J. Scots pine fine roots adjust along a 2000-km latitudinal climatic gradient. **New Phytologist**. v. 212. p. 389–399. 2016.
- ZETTERBERG, T., OLSSON, B. A., LÖFGREN, S., HYVÖNEN, R., BRANDTBERG, P. O. Long-term soil calcium depletion after conventional and whole-tree harvest. **Forest Ecology and Management**. v. 369. p. 102–115. 2016.

## 5 CAPÍTULO IV. RAÍZES DE PINUS COLONIZANDO TRONCOS MORTOS AINDA ERETOS: UM ATALHO NO PROCESSO BIOGEOQUÍMICO

### 5.1 RESUMO

Além de crescer no solo, raízes de *Pinus* colonizam a serapilheira, especialmente em condição de baixa fertilidade do solo. Em plantio de *Pinus herrerae* em Jaguariaíva – Paraná, também foi observado crescimento de raízes em troncos de árvores adultas mortas que permaneceram eretas. No presente estudo o efeito desse fenômeno foi descrito e analisado, com base em avaliações realizadas em árvores mortas colonizadas por raízes, árvores mortas sem raízes e árvores vivas. Após a morte da árvore, ocorre uma fase inicial onde é importante a ação de fungos saprofiticos. Aproximadamente entre 2 e 3,5 anos após a morte da árvore, as raízes das árvores adjacentes crescem interface lenho/casca, a partir dos horizontes H e F da serapilheira. Depois de 8,5 anos da morte da árvore, as raízes das árvores adjacentes podem alcançar até 3.3 m acima da superfície da serapilheira. Na interface lenho/casca forma-se um manto de raízes com comprimento maior que 1 km m<sup>-2</sup> e ~5 % de colonização ectomicorrízica. A presença de raízes na interface lenho/casca reduz a concentração de P, K e Fe do lenho em contato com as raízes e a concentração de Zn nas cascas das árvores mortas. Conclui-se que as raízes de *P. herrerae* colonizam troncos de árvores mortas como estratégia de aquisição de nutrientes, se caracterizando como um atalho na ciclagem biogeoquímica.

Palavras-Chave: Sítio florestal, IMA, Produtividade de madeira.

## 5.2 ABSTRACT

Besides growing in the soil, *Pinus* roots colonize litter, debris and dead roots, especially in conditions of low soil fertility. In a *Pinus herrerae* M. planting, roots growing in trunks of dead adult trees was observed as well. Our study investigated the extent of this phenomenon considering evaluations on dead trees colonized by roots, dead trees without roots and alive trees. Our results showed that after tree death an initial phase occurs where the action of saprophytic fungi is important for creating a growing media and about 2.5 to 3 years after the tree death, roots of adjacent trees grow at the wood/bark interface, starting at the horizons F and H of the litter. After 8.5 years of tree death, roots of adjacent trees may reach up to 3.3 m above the surface of the litter. At the wood/bark interface a root mantle form itself with length greater than 1 km m<sup>-2</sup> and ~5 % of ectomycorrhizal colonization. Roots presence in the wood/bark interface reduced the P, K and Fe contents of dead wood connected with roots and also the Zn content in the bark of the dead trees. Our results indicate that roots of *P. herrerae* are capable of colonizing dead tree trunks and use them as a nutrient resource pool. This nutrient acquisition mechanism may be able to provide a shortcut in the biogeochemical cycling of these forests.

Key-Words: Forestry site, MAI, Wood yield.

### 5.3 INTRODUÇÃO

Em sistemas florestais com *Pinus* pode ocorrer quantidade expressiva de serapilheira, como em povoamentos no sul do Brasil, onde a queima controlada raramente é utilizada (Batista et al. 2015; Trentini et al. 2017). Estudos indicam que a quantidade de serapilheira é inversamente proporcional a qualidade do sítio, que inclui a fertilidade do solo. Assim, esse acúmulo em solos de baixa fertilidade deve-se à baixa decomposição da serapilheira, devido à baixa atividade microbiana e associada à baixa concentração de nutrientes no material vegetal que cai no solo, devido à alta ciclagem interna de nutrientes no *Pinus* (Viera e Schumacher 2010; Primicia et al. 2014; Tangjang et al. 2015; Chen et al. 2016).

A adaptação do *Pinus* em solos de baixa fertilidade, ácidos e com outros fatores limitantes, está em grande parte associada à elevada resistência de seu sistema radicular. Abundância de raízes em solos com elevados teores de  $Al^{3+}$  e em fendas de rochas (Batista et al., 2015; Rodríguez-Robles et al. 2017) vem sendo reportada. A presença de ectomicorriza também é importante, dada a dependência das árvores de *Pinus* para absorção de nutrientes e água (Warren et al., 2008; Garcia et al., 2014; Lu et al., 2016). Além disso, em plantios de *Pinus*, a serapilheira, normalmente, é colonizada por uma grande quantidade de raízes (Helmisaari et al., 2007; Achat et al., 2008; Lopes et al. 2010, 2013; Adam, 2015), o que caracteriza a serapilheira como um nicho para o crescimento de raízes em ambientes extra solo. Inicialmente, as árvores de *Pinus* obtêm nutrientes a partir do solo, e após a deposição e decomposição dos resíduos vegetais, parte dos nutrientes volta para a planta devido à colonização da serapilheira. Assim, quanto mais velho o plantio, maior a importância da serapilheira na nutrição vegetal, sendo que a serapilheira se torna vital na ciclagem biogeoquímica de nutrientes na floresta (Krishna e Mohan, 2017).

O crescimento de raízes em galhos depositados na superfície da serapilheira de um plantio de *P. taeda* L. foi reportado por Motta et al. (2014). Em um plantio de *P. herrerae* localizado em Jaguariaíva/PR (Brasil), tem ocorrido morte prematura de árvores. Após a morte, estas permanecem eretas, e as árvores vivas adjacentes colonizam seus tecidos em decomposição. O principal foco desse estudo foi o relato

da colonização de ambiente extra solo pelas raízes de *P. herrerae*. Análises foram realizadas com a finalidade de caracterizar os efeitos da colonização radicular em árvores mortas de *P. herrerae*.

## 5.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo foi um povoamento de *Pinus herrerae*, localizado no polo florestal do município de Jaguariaíva/PR. O clima da região é Cfb (subtropical úmido, clima oceânico sem estação seca com verão temperado), com precipitação anual média de 1412 mm e temperaturas médias de 13,6 a 20,6 °C (Alvares et al. 2013), sendo comum a ocorrência de geadas. A região apresenta remanescentes de vegetação de Cerrado e os solos têm como material de origem os arenitos Furnas e Itararé.

O solo da área de estudo apresenta boa drenagem e foi classificado como Latossolo. Dados analíticos da área de estudo são apresentados na Tabela 4.1. A análise granulométrica (método do densímetro) do solo revelou os seguintes resultados: 75 % de areia, 2,5 % de silte e 22,5 % de argila, classificado como textura franco argilo arenosa.

TABELA 4.1. Atributos químicos do solo (camada 0–10 cm) da área de estudo, em Jaguariaíva/PR, Brasil.

pH <sup>1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al <sup>3+</sup>	CTC	SB	m	P	Fe	Zn	Cu	Mn	CO
	----- cmolc dm <sup>-3</sup> -----						%	%		----- mg dm <sup>-3</sup> -----				g dm <sup>-3</sup>
3.5	0.15	0.10	0.03	2.0	9.1	9.39	3.49	86	0.1	39.5	0.23	0.93	0.41	23

<sup>1</sup> pH (CaCl<sub>2</sub> 0.01 mol L<sup>-1</sup>); Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup> (extraído com KCl 1mol L<sup>-1</sup>); H+Al<sup>3+</sup> (extração com acetato de Ca 0.5 mol L<sup>-1</sup>); carbono orgânico (CO) (método volumétrico por dicromato de K); K<sup>+</sup>, P, Mn, Fe, Cu e Zn (Mehlich-1); saturação por bases (SB); saturação por Al<sup>3+</sup> (m); capacidade de troca de cátions (CTC).

O plantio de *P. herrerae* ocorreu em 1994, com mudas seminais em espaçamento 3 x 3 m, em área com 19.000 m<sup>2</sup> e em altitude de 790 m (Dvorak et al. 2007). Vale destacar que foi realizado queima de resíduos culturais de um ciclo de *P. taeda* L., que substituiu a



vegetação nativa antes do plantio com *P. herrerae*. Nenhum dos dois ciclos de *Pinus* (*P. taeda* e *P. herrerae*) recebeu correção ou fertilização do solo.

#### 5.4.2 COLETA DE AMOSTRAS DE PLANTA, SERRAPILHEIRA E SOLO

Na ocasião da coleta (agosto de 2014), as árvores vivas estavam com 21 anos de idade, com pouca cobertura de dossel e acículas amareladas. As árvores tinham em média 24,4 cm de diâmetro na base, 20,5cm de diâmetro na altura do peito e o fuste em média 7,55 m. A condição das árvores foi considerada como tratamentos: árvores vivas; árvores mortas; árvores mortas colonizadas por raízes das árvores adjacentes.

Foram cortadas quatro árvores em cada um dos tratamentos, sendo o corte das árvores realizado na altura da serapilheira. Nas árvores mortas com raízes na interface lenho/casca foi medida a altura que as raízes cresceram na interface lenho/casca das árvores mortas. Posteriormente, foram coletadas amostras simples (terço inferior, médio e superior) de raízes da interface lenho/casca, formando amostras compostas. Também foram coletados quatro monólitos indeformados da serapilheira e de solo (10 x 10 x 10 cm) a um metro de distância do tronco de cada árvore, formando amostras compostas.

De todas as árvores analisadas foi retirado um disco na base do tronco, juntamente com suas cascas. Adicionalmente, foram coletadas acículas do primeiro e segundo lançamento das árvores vivas, no terço médio da árvore e nos quatro sentidos cardeais.

#### 5.4.3 IDENTIFICAÇÃO DA FONTE E DO TIPO DE RAÍZES QUE COLONIZAM AS ÁRVORES MORTAS

A casca da base e a serapilheira próxima à base das árvores mortas colonizadas por raízes foram retiradas manualmente. Em seguida, as raízes que colonizavam as árvores mortas foram acompanhadas até ser encontrada a sua fonte (árvores vivas). Para isso, foi necessária a retirada da serapilheira e a escavação da superfície do solo por vários metros. Assim, também foi possível classificar a ordem das raízes encontradas nas árvores mortas.

#### 5.4.4 ANÁLISES DAS AMOSTRAS

A idade das árvores foi determinada a partir da contagem dos anéis de crescimento do disco da base de cada árvore. O tempo para ocorrer o crescimento de raízes nas árvores mortas foi estimado pela diferença de idade das árvores mortas sem raízes e árvores mortas com raízes em relação às árvores vivas.

A obtenção das raízes do solo foi por peneiramento em malha de inox, com diâmetro de 2 mm (a mesma peneira foi utilizada para os demais procedimentos). As raízes provenientes da serapilheira foram obtidas por separação manual e auxílio de pinça, sendo a serapilheira dividida em quatro horizontes (serapilheira nova, serapilheira velha, horizonte fragmentado-F e horizonte humificado-H). É importante destacar que tanto na serapilheira nova quanto na velha não foram encontradas raízes.

A porcentagem de colonização micorrízica das raízes provenientes de todos os compartimentos com raízes (solo, horizontes F e H e, interface lenho/casca) também foi determinada. De cada amostra de raiz se adquiriu aleatoriamente 100 segmentos com aproximadamente 2 cm de comprimento, e com auxílio de lupa (ampliação de 30x), foi determinada a frequência de segmentos colonizados por fungos ectomicorrízicos. As raízes finas (diâmetro < 2 mm) de cada compartimento foram submetidas à análise pelo software SAFIRA®, para determinar o comprimento total de raízes. Atributos radiculares que foram expressos por unidade de área consideram a área superficial de cada amostra coletada nos diferentes ambientes (interface lenho/casca, serapilheira e solo), sendo que nas árvores mortas foi considerado apenas a área superficial do lenho com presença de raízes.

As amostras dos discos do tronco, cascas, raízes, serapilheira e acículas foram submetidas a secagem em estufa de circulação de ar à 65 °C. Nos discos do tronco de cada árvore foram coletadas amostras de lenho na camada de 0–5 mm. Essa etapa foi realizada com auxílio de um cilindro metálico oco com diâmetro interno de 2 cm, obtendo-se amostras no sentido radial do tronco, assim foi possível seccionar na camada desejada (0–5 mm). As amostras de raízes foram separadas do lenho e casca com auxílio de pinça e seca para determinação da massa radicular. As amostras de lenho, cascas, raízes, serapilheira (horizontes F e H) e acículas após secagem foram moídas em moinho de facas tipo Willey e passados em peneira com malha de 1 mm.

Para análise da composição elementar das amostras (em duplicata), 1 g de material vegetal moído foi incinerado em cadinhos de porcelana em mufla a 500 °C por 4 horas. Após resfriamento dos cadinhos, as cinzas foram solubilizadas com HCl 3 mol L<sup>-1</sup>. Em seguida, novamente os cadinhos ficaram em mufla a 500 °C por 4 horas. Então, foram adicionados 10 mL de HCl 3 mol L<sup>-1</sup> e os cadinhos permaneceram por 10 minutos em chapa de aquecimento a 60–70 °C. Transcorrido esse período, as soluções de digestão foram filtradas em papel filtro e os extratos coletados em balões volumétricos de 50 mL e completado volume com água deionizada. Nos extratos obtidos, foram determinados os teores de K, Ca, Mg, P, Mn, Fe, Zn, Cu e Al com espectrômetro de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) (Varian, 720-ES). As características de funcionamento do ICP-OES foram: fluxo de plasma 15 L min<sup>-1</sup>; fluxo de ar auxiliar 1.5 min L<sup>-1</sup>; pressão de nebulização 200 kPa; tempo de estabilização 15 s; tempo de amostra simples 15 s; tempo de enxágue 10 s; energia 1.0 kW; número de repetições 3.

#### 5.4.5 ANÁLISE DOS DADOS

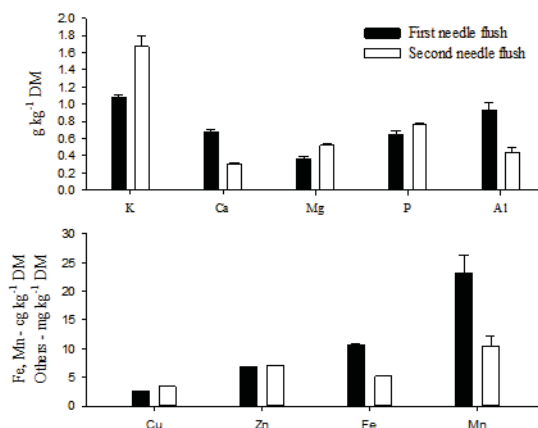
Os teores de nutrientes na superfície do lenho e nas cascas nos tratamentos (AT, DT, SDT) foram comparados pelo teste estatístico LSD ( $p < 0,05$ ). Para todos os demais dados são apresentados os valores de desvio padrão das repetições ( $n = 4$ ) que geraram cada média apresentada.

### 5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.5.1 ESTADO NUTRICIONAL DO *Pinus herrerae* M.

As plantas de *P. herrerae* apresentaram níveis nutricionais baixos (Figura 4.1), mesmo quando em comparação com árvores de *Pinus* crescendo sob condições nutricionais de extrema deficiência (Chaves e Corrêa 2003, 2005; Batista et al. 2015). A carência de nutrientes nesse povoamento foi constatada no momento da coleta, onde verificou-se que as acículas das árvores apresentavam amarelecimento generalizado e, possivelmente, contribuiu para a morte prematura das árvores.

FIGURA 4.1. Concentração de nutrientes nas acículas de *Pinus herrerae* com 21 anos de idade, Jaguariaíva/PR, Brazil. As barras representam o desvio padrão.



Tal fato deve-se à baixa fertilidade natural do solo, sobretudo com relação à P, K, Ca e Mg (Tabela 4.1), dado a pobreza do material de origem (Batista et al. 2015), elevado grau de intemperismo do solo (Latossolo) e à ausência de aplicação de fertilizantes.

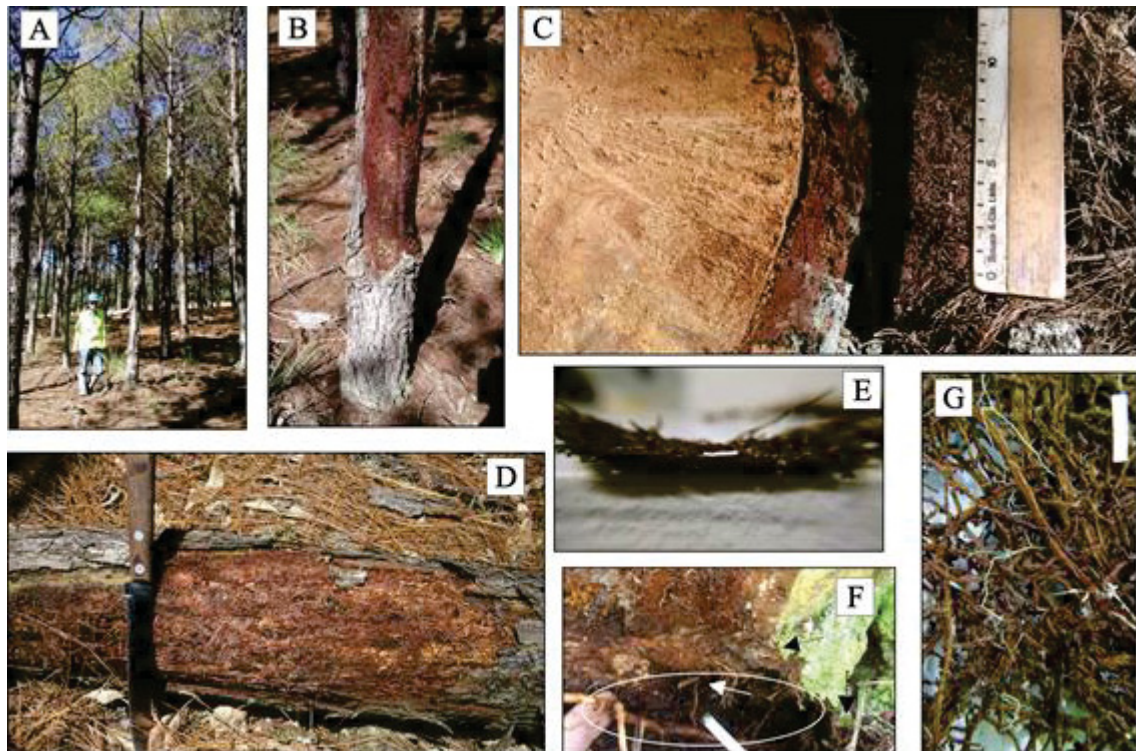
#### 5.5.2 FENÔMENO DE COLONIZAÇÃO DE ÁRVORES MORTAS EM *Pinus herrerae*

O povoamento de *P. herrerae* apresentou alta luminosidade no seu interior, com acículas curtas e com clorose na porção distal, sendo registrada a morte prematura de árvores (Figura 4.2; Figura 4.3 A). A morte de alguns indivíduos de *P. herrerae* ocorreu com queda prematura e clorose das acículas, seguido de morte dos galhos baixeiros e progredindo para os mais novos, até que toda a copa era perdida e resultando em morte por completo. As árvores permaneceram eretas por vários anos após a morte, dado provavelmente pela proteção contra o vento, por estar no meio do plantio.

Após a morte das árvores, o processo de decomposição de seus tecidos deve ter iniciado, sendo que em algumas árvores mortas sem raízes foi verificado a presença de fungos saprofitos, indicando a colonização da microbiota decompositora. Com base na estimativa da idade das árvores mortas com e sem colonização de raízes das árvores adjacentes, verificou-se que o período entre a morte das árvores e a ocorrência de penetração de raízes nos tecidos foi de

aproximadamente 2 a 3,5 anos. Posteriormente, ainda com as árvores eretas, ocorreu a colonização da árvore morta por raízes das árvores adjacentes. A colonização ocorreu a partir da penetração de raízes através da casca, no nível dos horizontes F e H da serapilheira (Figura 4.2).

FIGURA 4.2. Espécime de *Pinus herrerae* morto, ainda ereto, em povoamento com 21 anos em Jaguariaíva/PR, Brasil (A); as raízes das árvores adjacentes colonizaram a região entre o lenho e a casca, atingindo até 3,3 metros acima do nível da serapilheira (B); formando um manto de raízes entremeadas, sendo que as raízes também cresceram na parte interna da casca da árvore morta (C); detalhe da base do tronco da árvore colonizada por raízes (D); detalhe do manto de raízes entremeadas coletado da base da árvore (E); detalhe da penetração de raízes secundárias através da casca da árvore morta (seta branca); casca da árvore morta (seta preta); nível dos horizontes F (fragmentado) e H (humificado) da serapilheira (seta preta pontilhada); a serapilheira foi removida para observação do fenômeno (F); detalhe do manto de raízes e micorrizas formado na interface casca/lenho da planta morta, parte mediana da zona colonizada (G). A escala das fotos E e G tem 5 x 1 mm.



No estágio de colonização, considerado inicial no presente estudo, foi classificada apenas uma árvore (A1) que apresentou colonização por raízes na interface lenho/casca até altura de 0,7 m a partir da superfície da serapilheira. Essa árvore (A1) morreu aproximadamente há 3,5 anos do momento da coleta. Foram classificadas três árvores em estágio avançado de colonização, onde as raízes na interface lenho/casca atingiram entre 2,0 e 3,3 metros de altura. As árvores neste estágio avançado permaneceram eretas por pelo menos 8,5 anos após a morte. A



casca das árvores nesse estágio apresentou-se retorcida a ponto de ocorrer pequenas aberturas, embora ainda estivessem juntas ao tronco. Nesses casos, as raízes se apresentavam desidratadas.

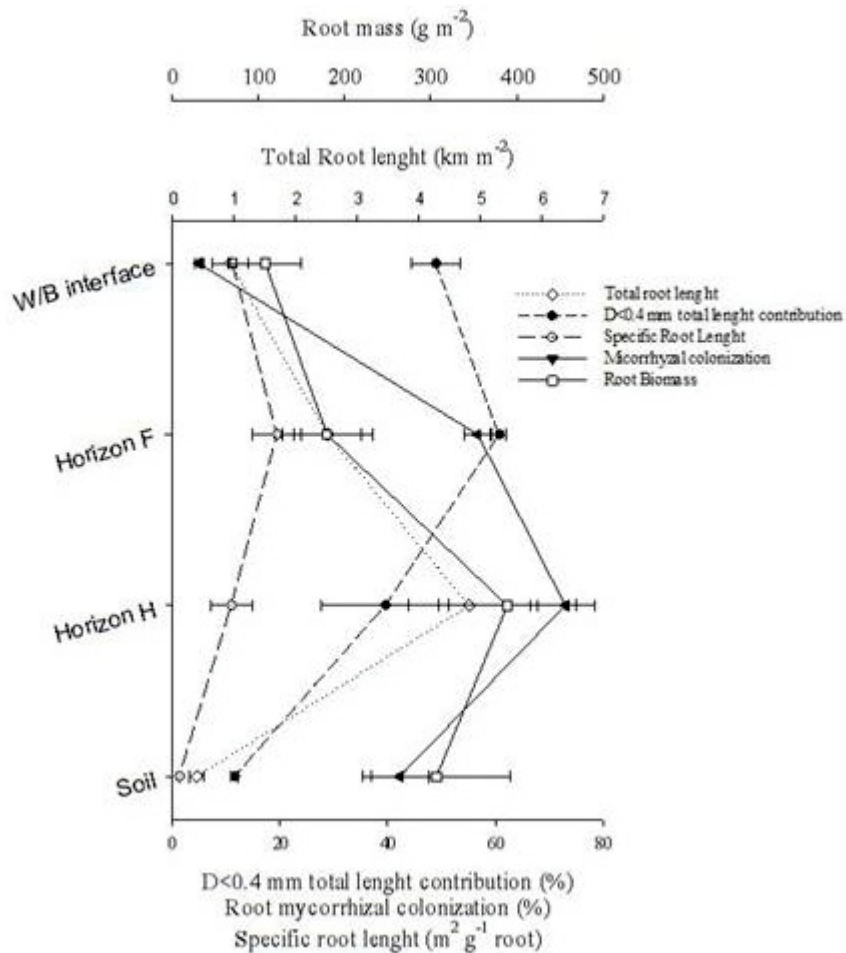
Constatou-se que as raízes que colonizavam as árvores mortas eram provenientes de árvores que estavam entre três e seis metros de distância e que eram de ordem secundária, provenientes de raízes superficiais de ordem primária. Em geral, é conhecido que as raízes podem ter o seu crescimento direcionado pela gravidade, água, oxigênio, entre outros fatores ambientais (Singh et al. 2017). No caso do crescimento orientado pela gravidade, estudos indicam que raízes superficiais de primeira e segunda ordens podem ter crescimento no mesmo sentido ou sentido contrário ao da gravidade (Coutts e Nicoll 1991; Jourdan 2000; Achat et al. 2008), sendo consideradas como uma vantagem adaptativa, pois é na camada superficial em que geralmente ocorre maior quantidade de nutrientes, devido à deposição através dos resíduos vegetais. Neste estudo, constatou-se que as raízes superficiais de *P. herrerae* apresentaram capacidade de crescimento no sentido contrário ao da gravidade – geotropismo negativo (Figura 4.2). Contudo, provavelmente, existe um limite de tolerância para o crescimento dessas raízes, pois não foi constatado crescimento na serapilheira nova e na serapilheira velha. Assim, o crescimento de raízes na interface lenho/casca nas árvores mortas indicou condições favoráveis, possibilitando o crescimento vertical das raízes.

### 5.5.3 CARACTERÍSTICAS DAS RAÍZES

As características das raízes na interface lenho/casca foram diferentes das verificadas nos demais ambientes analisados (solo, horizontes H e F da serapilheira) (Figura 4.3). O comprimento total de raízes na interface lenho/casca das árvores mortas foi em média  $1 \text{ km m}^{-2}$ , o que é equivalente à 1/8 do reportado para a fração solo+serapilheira do presente estudo (Figura 4.3). Todavia, o manto de raízes formado nesse ambiente (interface lenho/casca) não possuiu mais do que 5 mm de espessura (Figura 4.2E), enquanto a fração solo+serapilheira possuiu no mínimo 17 cm (10 cm do solo e 7 da serapilheira). Ou seja, em termos de colonização radicular, aproximadamente 1/34 da espessura conteve até 1/4 da quantidade de raízes (em comprimento), sendo que essa mesma tendência ocorreu para massa de raízes.

Assim, ocorreu abundante crescimento de raízes na interface lenho/casca das árvores mortas, sobretudo de raízes com diâmetro inferior a 0,4 mm.

FIGURA 4.3. Atributos biométricos de raízes de *Pinus herrerae* no solo, nos horizontes H e F da serapilheira e, na interface lenho/casca. As barras representam o desvio padrão.



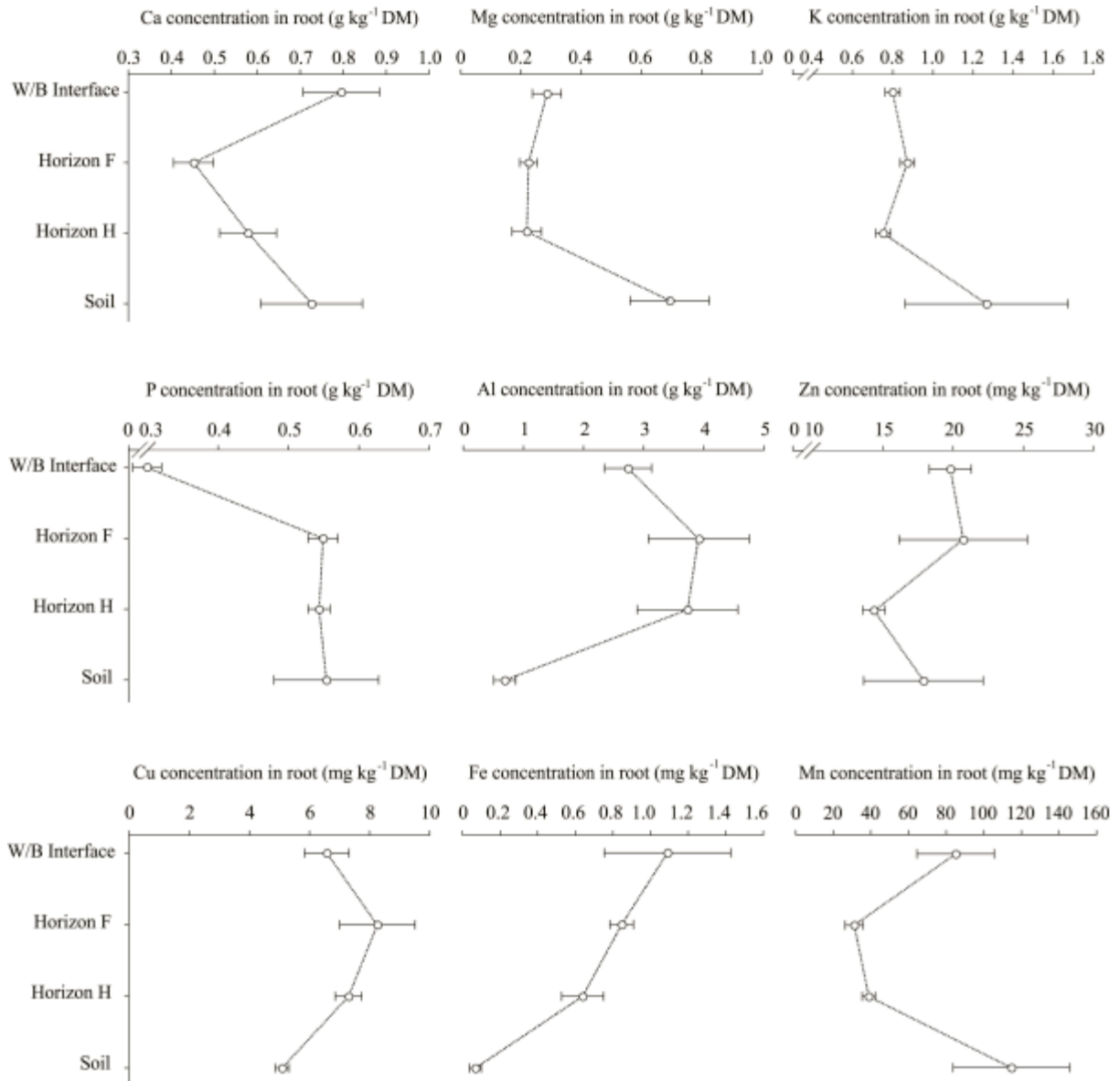
As raízes coletadas no solo, horizonte H e horizonte F da serapilheira apresentaram 42, 76 e 58% de colonização ectomicorrízica, respectivamente (Figura 4.4). Essa elevada colonização ectomicorrízica está associada com a carência de P (Smith e Read 2008), como verificado pelos baixos valores de P na análise de solo (Tabela 4.1), serapilheira (Tabela 4.2) e acículas (Figura 4.1). Em termos médios, verificou-se que as raízes são mais abundantes na serapilheira em comparação aos primeiros 10 cm do solo, sobretudo no horizonte H da serapilheira (Figura 4.3). Esses resultados corroboram com outros estudos que avaliaram o crescimento radicular em *Pinus* (Helmisaari et al. 2007; Achat et al. 2008; Lopes et al. 2010). A



ocorrência de grande quantidade de raízes na serapilheira pode ser interpretada como uma forma de aquisição de nutrientes lixiviados do dossel da planta e dos nutrientes contidos nos resíduos em decomposição (Kiser et al. 2013; Batista et al. 2015; Krishna and Mohan 2017).

Por outro lado, a colonização ectomicorrizica das raízes que cresceram na interface lenho/casca foi baixa (Figura 4.3) num ambiente com baixos teores de P (Figura 4.5). Isso indica que outros fatores provavelmente afetaram esses resultados, como variações de umidade e temperatura, pois as árvores mortas não apresentavam mais dossel, assim, recebiam maior incidência de radiação solar. Nesse sentido, a quantidade de inóculo dos fungos no ambiente lenho/casca pode ter sido limitante ou parte das estruturas fúngicas das ectomicorrizas podem ter sido perdidas, devido à menor longevidade e à sua rápida decomposição em comparação às raízes (Koide et al. 2011). A menor longevidade dos fungos pode ter ocorrido por fatores abióticos (Fernandez et al. 2016).

FIGURA 4.4. Teores médios de nutrientes e Al nas raízes de *Pinus herrerae* nos ambientes em que estas se encontram. As barras representam o desvio padrão.



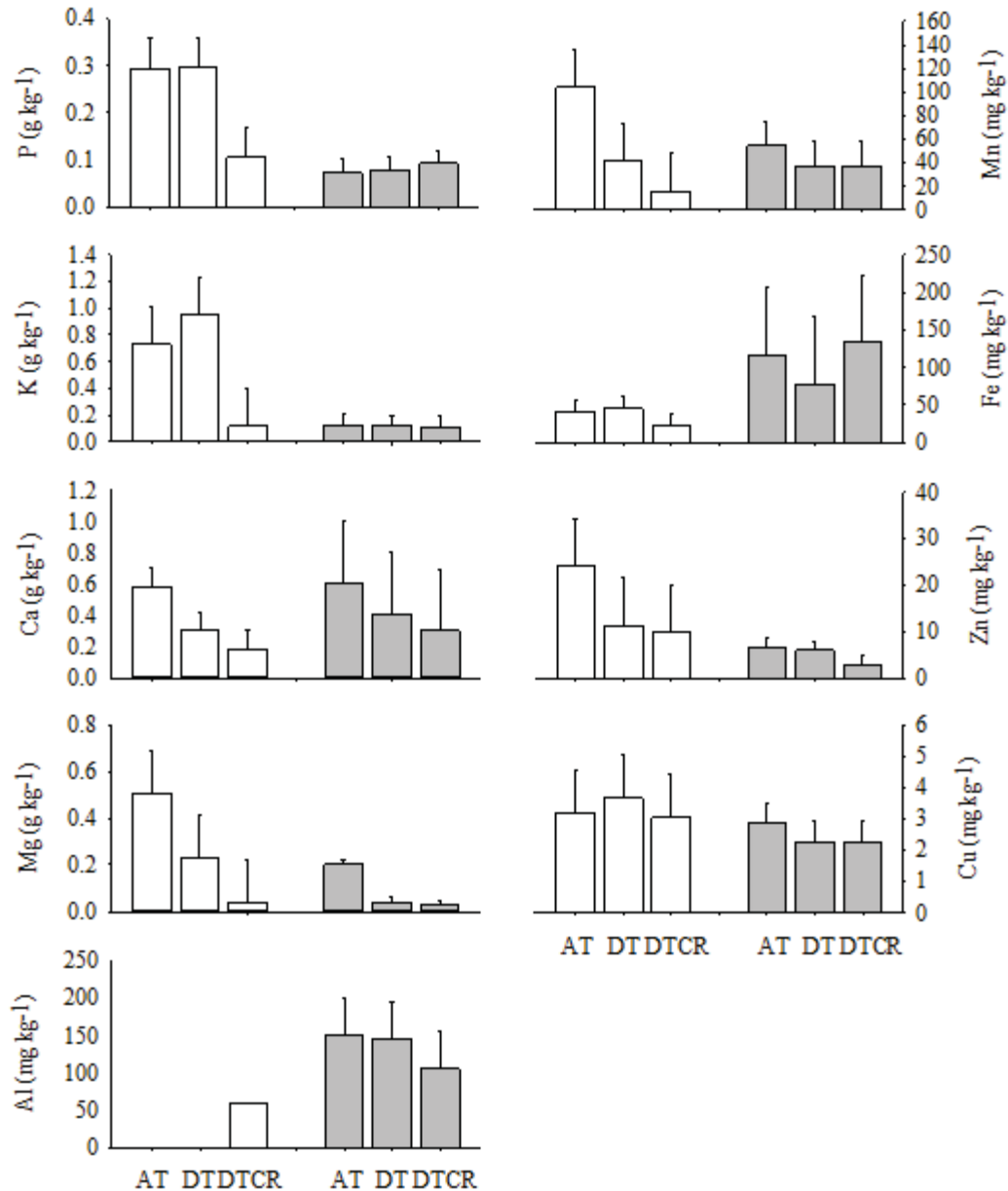
O nutriente que mais diferenciou as raízes da interface lenho/casca das árvores mortas foi o P, sendo menor em comparação aos demais ambientes (solo, horizonte H e F da serapilheira) (Figura 4.4). Considerando que as concentrações de P nos horizontes da serapilheira com crescimento de raízes (horizontes F e H) são similares às encontradas no lenho das árvores mortas, um dos motivos das baixas concentrações de P nas raízes que colonizaram as árvores mortas são as baixas concentrações desse nutriente na casca (Tabela 4.2; Figura 4.5). Contudo, a baixa colonização ectomicorrízica (Figura 4.4) também pode ter sido responsável pelos baixos teores de P nessas raízes (Lu et al. 2016). Por outro lado, as raízes da

interface lenho/casca das árvores mortas apresentaram teores de Mg, K, Zn, Fe, Cu e Al similares as raízes na serapilheira e, teores de Ca e Mn similares às raízes no solo (Figura 4.5).

#### 5.5.4 EFEITO DA COLONIZAÇÃO POR RAÍZES NO TEOR DE NUTRIENTES NO LENHO E NA CASCA DAS ÁRVORES MORTAS

As concentrações de P, Fe e K no lenho das árvores mortas colonizadas por raízes foram aproximadamente 50, 50 e 25 % inferiores as concentrações registradas no lenho das demais árvores (vivas e mortas sem colonização por raízes). Por outro lado, o Zn foi o único elemento que teve menor concentração (~50 %) na casca das árvores mortas colonizadas por raízes em comparação as árvores vivas e as árvores mortas sem colonização por raízes (Figura 4.5). O crescimento de raízes finas de espécies de *Pinus* é favorecido pelo aumento na disponibilidade de P e K (Sardans et al. 2004; Lopes et al. 2013; Zhang et al. 2013; Pacé et al. 2016). Assim, provavelmente a diminuição das concentrações desses nutrientes na região do lenho das árvores mortas colonizadas por raízes decorreu da absorção desses macronutrientes. Embora as exigências em Fe e Zn sejam relativamente baixas, uma vez que são micronutrientes (Taiz et al. 2015), a diminuição das concentrações no lenho e na casca das árvores mortas colonizadas por raízes, provavelmente também decorreu da absorção pelas raízes.

FIGURA 4.5. Teores médios de nutrientes e Al na superfície (0–5 mm) do lenho (barras brancas) e da casca (barras cinzas) de *Pinus herrerae*, em Jaguariaíva/PR, Brazil. As barras representam a diferença mínima significativa ( $p < 0.05$ ).



O Al foi detectado apenas no lenho das árvores colonizadas por raízes (Figura 4.5). É possível que o Al seja resultante de contaminação da superfície do lenho com raízes finas entremeadas, que não saíram na limpeza pré-digestão do material, pois as raízes contêm Al em sua composição. Todavia, as raízes da interface lenho/casca foram apenas 9x mais concentradas em Al que o lenho, indicando que a contaminação teria que ser na ordem de 10% em massa, ou seja, a influência por contaminação seria ínfima. Assim, é possível que tenha ocorrido

enriquecimento do material lenhoso em Al proveniente da casca, pois esse elemento foi detectado nas cascas de todas as árvores e em concentrações maiores que aquela registrada para o lenho da planta colonizada (Figura 4.5). Parte do Al pode ser proveniente da casca em decomposição, acelerada pela presença de raízes ou devido a extrusão pelas raízes do *P. herrerae*, visto que a extrusão de uma parte do Al absorvido pelas raízes é um mecanismo de tolerância que ocorre em árvores lenhosas nativas de solos ácidos (Brunner e Sperisen 2013).

O crescimento radicular na serapilheira em sistemas florestais é reconhecido por trazer implicações diretas para nutrição das plantas e para a ciclagem biogeoquímica de nutrientes (Helmisaari et al., 2007; Achat et al., 2008; Krishna e Mohan 2017). Nesse sentido, a alteração na composição do lenho e da casca das árvores mortas colonizadas por raízes (Figura 4.5), indica que o crescimento de raízes de *P. herrerae* na interface lenho/casca de árvores mortas também pode trazer efeitos para a ciclagem de nutrientes. Provavelmente esse efeito não seja limitado apenas ao *P. herrerae*, tendo em vista que, em geral, as espécies do gênero *Pinus* possuem capacidade de crescimento radicular em ambientes diversos (Motta et al., 2014; Batista et al., 2015; Rodríguez-Robles et al. 2017).

## 5.6 CONCLUSÕES

Nesse estudo, avaliou-se o fenômeno de crescimento de raízes de plantas vivas de *P. herrerae* no tronco de árvores mortas da mesma espécie, no qual as raízes das árvores vivas cresceram na serapilheira e, em seguida, colonizaram a interface lenho/casca das árvores mortas. As raízes na interface lenho/casca das árvores mortas atingiram até 3,3 m acima da superfície da serapilheira e se diferenciaram morfológicamente, nível de colonização ectomicorrízica e teor de P em comparação às raízes encontradas na serapilheira e no solo. O fenômeno pode ser considerado como um atalho na ciclagem biogeoquímica, pois evidenciou-se que a presença de raízes diminuiu os teores de P, K e Fe no lenho e, Zn na casca das árvores mortas. Assim, o estudo contribui para o conhecimento acerca do ciclo dos nutrientes em ecossistemas florestais e abre um novo caminho para futuras pesquisas nesse contexto.

## 5.7 REFERÊNCIAS

- ACHAT, D. L., BAKKER, M. R., TRICHET, P. Rooting patterns and fine root biomass of *Pinus pinaster* assessed by trench wall and core methods. **Journal of Forest Research**. v. 13, p.165–175. 2008. doi: 10.1007/s10310-008-0071-y
- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., DE MORAES, GONÇALVES, J. L., SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**.v. 22. p.711–728. 2013.
- BATISTA, A. H., MOTTA, A. C. V. , REISSMANN, C. B., et al. Liming and fertilisation in *Pinus taeda* plantations with severe nutrient deficiency in savanna soils. **Acta Scientiarum. Agronomy**. v. 37 p.117–125. 2015. DOI: 10.4025/actasciagron.v37i1.18061
- BRUNNER, I., SPERISEN, C. Aluminum exclusion and aluminum tolerance in woody plants. **Frontiers in Plant Science**. v.4. p.1–12. 2013. DOI: 10.3389/fpls.2013.00172
- 2
- CHAVES, R. DE Q., CORRÊA, G. F. Micronutrients in the soil - *Pinus caribaea* Morelet system with yellowing of the needles followed by senescence and death. **Revista Árvore**. v. 27. p. 769–778. 2003.
- CHAVES, R. DE Q., CORRÊA, G. F. Macronutrients in the soil - *Pinus caribaea* Morelet system with yellowing of the needles followed by senescence and death. **Revista Árvore**. v. 29. p. 691–700. 2005.
- CHEN, Y., SAYER, E. J., LI, Z., et al. Nutrient limitation of woody debris decomposition in a tropical forest: Contrasting effects of N and P addition. **Functional Ecology**. v. 30. p. 295–304. 2016. DOI: 10.1111/1365-2435.12471
- COUTTS, M. P., NICOLL, B. C. Orientation of the lateral roots of trees: I. Upward growth of surface roots and deflection near the soil surface. **New Phytology**. v. 119. p. 227–234. 1991. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1991.tb01025.x
- DVORAK, W. S., KIETZKA, E., HODGE, G. R., et al. Assessing the potential of *Pinus herrerae* as a plantation species for the subtropics. **Forest Ecology and Management**. v. 242. p. 598–605. 2007. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.01.076
- FERNANDEZ, C. W., LANGLEY, J. A., CHAPMAN, S., et al. The decomposition of ectomycorrhizal fungal necromass. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 93. p.38–49. 2016. DOI: 10.1016/j.soilbio.2015.10.017.
- HELMISAARI, H. S., DEROME, J., NOJD, P., KUKKOLA, M. Fine root biomass in relation to site and stand characteristics in Norway spruce and Scots pine stands. **Tree Physiology**. v. 27. p.1493–1504. 2007. DOI: 10.1093/treephys/27.10.14933
- JOURDAN, C. Root System Architecture and Gravitropism in the Oil Palm. **Annals of Botany**. v. 85. p. 861–868. 2000. DOI: 10.1006/anbo.2000.1148.

- KISER, L. C., FOX, T. R., CARLSON, C. A. Foliage and litter chemistry, decomposition, and nutrient release in *Pinus taeda*. **Forests**. v. 4. p. 595–612. 2013. DOI: 10.3390/f4030595.
- KOIDE, R. T., FERNANDEZ, C. W., PEOPLES, M. S. Can ectomycorrhizal colonization of *Pinus resinosa* roots affect their decomposition? **New Phytologist**. v. 191. p. 508–514. 2011. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2011.03694.x.
- KRISHNA, M. P., MOHAN, M. Litter decomposition in forest ecosystems: a review. **Energy, Ecology and Environment**. v. 2. p. 236–249. 2017. DOI: 10.1007/s40974-017-0064-9.
- LOPES, V. G., SCHUMACHER, M. V., CALIL, F. N., et al. Fine root quantification in a *Pinus taeda* L. stand and in grassland area in Cambará do Sul (RS). **Ciência Florestal**. v. 20. p. 569–578. 2010
- LOPES, V. G., SCHUMACHER, M. V., MÜLLER, I., CALIL, F. N., WITSCHORECK, R., LIBERALESSO, E. Physical and chemical soil variables affecting *Pinus taeda* L. fine roots distribution in northeast of Rio Grande do Sul, Brazil. **Ecologia e Nutrição Florestal**. v.1. p. 14–23. 2013.
- LU, N., YU, M., CUI, M., et al. Effects of different ectomycorrhizal fungal inoculates on the growth of *Pinus tabulaeformis* seedlings under greenhouse conditions. **Forests**. v. 7. p.1–14. 2016. DOI: 10.3390/f7120316
- MOTTA, A. C. V., BARBOSA, J. Z., CONSALTER, R., REISSMANN, C. B. Nutrição e Adubação da Cultura de Pínus. In: Prado R de M, Wadt PGS (eds) **Nutrição e adubação de espécies florestais e palmeiras**, 1st edn. FUNEP, Jaboticabal, pp 383–426. 2014.
- PACÉ, M., FENTON, N. J., PARÉ, D., BERGERON, Y. Ground-layer composition affects tree fine root biomass and soil nutrient availability in jack pine and black spruce forests under extreme drainage conditions. **Canadian Journal of Forest Research**. v. 47. p. 433–444. 2016.
- PRIMICIA, I., IMBERT, J. B., TRAVER, M. C., CASTILLO, F. J. Inter-specific competition and management modify the morphology, nutrient content and resorption in Scots pine needles. **European Journal of Forest Research**. v. 133. p. 141–151. 2014. doi: 10.1007/s10342-013-0753-7
- RODRÍGUEZ-ROBLES, U., ARREDONDO, T., HUBER-SANNWALD, E., et al. Application of geophysical tools for tree root studies in forest ecosystems in complex soils. **Biogeosciences Discussions**. p. 1–22. 2017. doi: 10.5194/bg-2017-91
- SARDANS, J., RODÀ, F., PENUELAS, J. Phosphorus limitation and competitive capacities of *Pinus halepensis* and *Quercus ilex* subsp. *rotundifolia* on different soils. **Plant Ecology**. v. 174. p. 305–317. 2004. doi: 10.1023/B:VEGE.0000049110.88127.a0



SINGH, M., GUPTA, A., LAXMI, A. Striking the right chord: signaling enigma during root gravitropism. **Frontiers in Plant Science**. v. 8.p. 1–17. 2017. doi: 10.3389/fpls.2017.01304

SMITH, S. E., READ, D. **Mycorrhizal Symbiosis**, 3rd ed. Academic Press and Elsevier, London. 2008.

TAIZ, L., ZEIGER, E., MØLLER, I. M., MURPHY, A. **Plant physiology and development**. Sinauer Associates. 2015.

TANGJANG, S., ARUNACHALAM, A., ARUNACHALAM, K., DEB, S. Litterfall, decomposition and nutrient dynamics in traditional agro- forestry systems of Northeast India. **International Journal of Ecology and Environmental Sciences**. v. 41. p. 43–53. 2015.

TRENTINI, C. P., CAMPANELLO, P. I., VILLAGRA, M., et al. Thinning of loblolly pine plantations in subtropical Argentina: Impact on microclimate and understory vegetation. **Forest Ecology and Management**. v. 384. p. 36–247. 2017. doi: 10.1016/j.foreco.2016.10.040

VIERA, M., SCHUMACHER, M. V. Teores e aporte de nutrientes na serapilheira de *Pinus taeda* L., e sua relação com a temperatura do ar e pluviosidade. **Revista Árvore**. v. 34. p. 85–94. 2010a. doi: 10.1590/S0100-67622010000100010

ZHANG, Y., ZHOU, Z., YANG, Q. Genetic variations in root morphology and phosphorus efficiency of *Pinus massoniana* under heterogeneous and homogeneous low phosphorus conditions. **Plant Soil**. v. 364. p. 93–104. 2013. doi: 10.1007/s11104-012-1352-y

## 6 CONCLUSÃO

O polo florestal de Jaguariaíva/PR apresenta carência generalizada do nutriente P, onde a aplicação do nutriente ( $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ ) em plantios estabelecidos, com idade variando entre 5 e 17 anos, resulta em acréscimos substanciais de produtividade por até, ou mais, de sete anos. A aplicação de calcário e micronutrientes como Cu e Zn, sobre a serrapilheira de plantios estabelecidos, pode apresentar efeito tóxico visto a importância deste ambiente na ciclagem biogeoquímica de nutrientes no “sistema florestal”. Apesar da pobreza generalizada em K nos solos da região as plantas de *P. taeda* L. crescem satisfatoriamente sem apresentar carência do nutriente. Entre os mecanismos de adaptação a essa limitação físico-química (carência de K) identificamos a adaptação na ciclagem de acículas e quantidade de raízes na serrapilheira. A espécie *P. herrerae* M. apresenta uma adaptabilidade extrema de seu sistema radicular a pobreza química do solo, quebram o geotropismo e colonizam a região entre a casca e o lenho de árvores que apresentaram morte prematura e permaneceram eretas em busca de principalmente P.

## REFERÊNCIAS

- ACHAT, D. L., BAKKER, M. R., TRICHET, P. Rooting patterns and fine root biomass of *Pinus pinaster* assessed by trench wall and core methods. **Journal of Forest Research**. v. 13, p.165–175. 2008. doi: 10.1007/s10310-008-0071-y
- ACHAT, D. L., POUSSE, N., NICOLAS, M., BRÉDOIRE, F., AUGUSTO, L. Soil properties controlling inorganic phosphorus availability: general results from a national forest network and a global compilation of the literature. **Biogeochemistry**. v.127. p.255–272. 2016.
- ADAM, W. M. **Composição química da serapilheira e raízes finas de *Pinus taeda* sob fertilização e calagem**. Universidade Federal do Paraná; 2015.
- ALBAUGH, T. J., ALLEN, H. L., ZUTTER, B.R., QUICKE, H. E. Vegetation control and fertilization in midrotation *Pinus taeda* stands in the southeastern United States. **Annals of Forest Science**. v.60. p.619–624. 2003.
- ALBAUGH, T. J., ALLEN, H. L., FOX, T. R. Nutrient use and uptake in *Pinus taeda*. **Tree Physiology**. v.28. p.1083–1098. 2008.
- ALBAUGH, T. J., FOX, T. R., RUBILAR, R. A., COOK, R. L., AMATEIS, R. L., BURKHART, H. E. Post-thinning density and fertilization affect *Pinus taeda* stand and individual tree growth. **Forest Ecology and Management**. v. 396. p. 207–216. 2017.
- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., DE MORAES, GONÇALVES, J. L., SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**.v. 22. p.711–728. 2013.
- ALVES, M. J. F., MELO, V. DE F., REISSMANN, C. B., KASEKER, J. F. Reserva mineral de potássio em latossolo cultivado com *Pinus taeda* L. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**.v. 37. p.1599–1610. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. – ABRAF. **Anuário Estatístico ABRAF 2013: Ano Base 2012**. Brasília; 2013.
- AUGUSTO, L., ACHAT, D. L., BAKKER, M. R., BERNIER, F., BERT, D., DANJON, F., & TRICHET, P. Biomass and nutrients in tree root systems–sustainable harvesting of an intensively managed *Pinus pinaster* (Ait.) planted forest. **Gcb Bioenergy**, v.7. p. 231-243. 2015.
- BAKKER, M. R., JOLICOEUR, E., TRICHET, P., AUGUSTO, L., PLASSARD, C., GUINBERTEAU, J., LOUSTAU, D. Adaptation of fine roots to annual fertilization and irrigation in a 13-year-old *Pinus pinaster* stand. **Tree Physiology**. v. 29. p. 229–238. 2009.

- BARBOSA, C. E. M., FERRARI, S., CARVALHO, M. DE P. E., PICOLI, P. R. F., CAVALLINI, M. C., BENETT, C. G. S., SANTOS, D. M. A. DOS. Inter-Relação da Produtividade de Madeira do *Pinus* com Atributos Físico-Químicos de um Latossolo do Cerrado. **Revista Árvore**. v. 36. p. 25–35. 2012.
- BARRIOS, R. O., MARTÍNEZ, S. D., RABANALES, D. E. V., JUÁREZ, W. S. Determinación del coeficiente y calidad de aserrío del género *Pinus* en la región Sierra Sur, Oaxaca, México. **Colombia Forestal**. v.19. p.79–93. 2016.
- BATISTA, A. H., MOTTA, A. C. V. , REISSMANN, C. B., *et al.* Liming and fertilisation in *Pinus taeda* plantations with severe nutrient deficiency in savanna soils. **Acta Scientiarum. Agronomy**. v. 37 p.117–125. 2015. doi: 10.4025/actasciagron.v37i1.18061
- BEKELE, A., HUDNALL, W. H., TIARKS, A. E. Response of Densely Stocked Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.) to applied Nitrogen and Phosphorus. **Southern Journal of Applied Forestry**. v. 27. p. 180–189. 2003.
- BERTHRONG, S. T., JOBBÁGY, E. G., JACKSON, R. B. A global meta-analysis of soil exchangeable cations, pH, carbon, and nitrogen with afforestation. **Ecological Applications**. v.19. p. 2228–2241. 2009.
- BLAGODATSKAYA, E. V., ANDERSON, T. H. Interactive effects of pH and substrate quality on the fungal-to-bacterial ratio and QCO<sub>2</sub> of microbial communities in forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 30. p. 1269–1274. 1998.
- BRANDTBERG, P. O., SIMONSSON, M. Aluminum and Iron Chemistry in the O Horizon Changed by a Shift in Tree Species Composition. **Biogeochemistry**. v. 63. p. 207–228. 2003.
- BRAVO, S., AMORÓS, J. A., PÉREZ-DE-LOS-REYES, C., GARCÍA, F. J., MORENO, M. M., SÁNCHEZ-ORMEÑO, M., HIGUERAS, P. Influence of the soil pH in the uptake and bioaccumulation of heavy metals (Fe, Zn, Cu, Pb and Mn) and other elements (Ca, K, Al, Sr and Ba) in vine leaves, Castilla-La Mancha (Spain). **Journal of Geochemical Exploration**. v. 174. p. 79–83. 2017.
- BRUNNER, I., SPERISEN, C. Aluminum exclusion and aluminum tolerance in woody plants. **Frontiers in Plant Science**. v.4. p.1–12. 2013. doi: 10.3389/fpls.2013.00172
- CARTER, M. C., FOSTER, C. D. Prescribed burning and productivity in southern pine forests: A review. **Forest Ecology and Management**. v.191. p.93–109. 2004.
- CHAVES, R. DE Q., CORRÊA, G. F. Micronutrients in the soil - *Pinus caribaea* Morelet system with yellowing of the needles followed by senescence and death. **Revista Árvore**. v. 27. p. 769–778. 2003.
- CHAVES, R. DE Q., CORRÊA, G. F. Macronutrients in the soil - *Pinus caribaea* Morelet system with yellowing of the needles followed by senescence and death. **Revista Árvore**. v. 29. p. 691–700. 2005.

CHEN, L., MU, X., YUAN, Z., DENG, Q., CHEN, Y., YUAN, L. Y., RYAN, L. T., KALLENBACH, R. L. Soil nutrients and water affect the age-related fine root biomass but not production in two plantation forests on the Loess Plateau, China. **Journal of Arid Environments**. v.135. p.173–180. 2016.

CHEN, Y., SAYER, E. J., LI, Z., *et al.* (2016) Nutrient limitation of woody debris decomposition in a tropical forest: Contrasting effects of N and P addition. **Functional Ecology**. v. 30. p. 295–304.2016. doi: 10.1111/1365-2435.12471

CHERNOBROVKINA, N. P., ROBONEN, E. V., UNZHAKOV, A. R., TYUTYUNNIK, N. N. Arginine in the life of coniferous plants. **Contemporary Problems of Ecology**. v. 9. p. 600–607. 2016.

CLARHOLM, M., SKYLLBERG, U., ROSLING, A. Soil Biology & Biochemistry  
Organic acid induced release of nutrients from metal-stabilized soil organic matter e  
The unbutton model. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 84. p. 168–176. 2015.

COUTTS, M. P., NICOLL, B. C. Orientation of the lateral roots of trees: I. Upward growth of surface roots and deflection near the soil surface. **New Phytology**. v. 119. p. 227–234. 1991. doi: 10.1111/j.1469-8137.1991.tb01025.x

DAVID, H. C., NETTO, S. P., ARCE, J. E., CORTE, A. P. D., FILHO, A. M., DE ARAÚJO, E. J. G. Efeito da qualidade do sítio e do desbaste na produção de pinus. **Floresta e Ambiente**. v.24. 2017.

DVORAK, W. S., KIETZKA, E., HODGE, G. R., *et al.* Assessing the potential of *Pinus herrerae* as a plantation species for the subtropics. **Forest Ecology and Management**. v. 242. p. 598–605. 2007. doi: 10.1016/j.foreco.2007.01.076

EIMIL-FRAGA, C., SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, F., ÁLVAREZ-RODRÍGUEZ, E., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. Variability in needle lifespan and foliar biomass along a gradient of soil fertility in maritime pine plantations on acid soils rich in organic matter. **Forest Ecology and Management**. v. 343. p. 34–41. 2015.

FAUSTINO, L. I., BULFE, N. M. L., PINAZO, M. A., MONTEOLIVA, S. E., GRACIANO, C. Dry weight partitioning and hydraulic traits in young *Pinus taeda* trees fertilized with nitrogen and phosphorus in a subtropical area. **Tree Physiology**. v. 33. p. 241–251. 2013.

FAUSTINO, L. I., MORETTI, A. P., GRACIANO, C. Fertilization with urea, ammonium and nitrate produce different effects on growth, hydraulic traits and drought tolerance in *Pinus taeda* seedlings. **Tree Physiology**. v. 35. p. 1062–1074. 2015.

FERNANDEZ, C. W., LANGLEY, J. A., CHAPMAN, S., et al. The decomposition of ectomycorrhizal fungal necromass. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 93. p. 38–49. 2016. DOI: 10.1016/j.soilbio.2015.10.017.

FERRENBURG, S., LANGENHAN, J. M., LOSKOT, S. A., ROZAL, L. M., MITTON, J. B. Resin monoterpene defenses decline within three widespread species of pine (*Pinus*) along a 1530-m elevational gradient. **Ecosphere**. v.8. 2017.

FILHO, N. F. DE B., SCHUMACHER, M. V., NEVES, J. C. L., BARROS, N. F., VALADARES, S. V. Tree Growth and Nutrient Dynamics in Pine Plantations in Southern Brazil. **Brazilian Journal of Soil Science**. v. 41. p. 1–12. 2017.

FOX, T., ALLEN, H., ALBAUGH, T. Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the southern United States. **Southern Journal of Applied Forestry**. v. 31. p. 5–11. 2007a.

FOX, T. R., JOKELA, E. J., ALLEN, H. L. The Development of Pine Plantation Silviculture in the Southern United States. **Journal of Forestry**. v. 105. p. 337–347. 2007b.

GIELEN, S., BATLLE, J. V., VINCKE, C., VAN HEES, M., VANDENHOVE, H. Concentrations and distributions of Al, Ca, Cl, K, Mg and Mn in a Scots pine forest in Belgium. **Ecological Modelling**. v. 324. p. 1–10. 2016.

GOLDBERG, S., FORSTER, H. S., HEICK, E. L. Boron adsorption mechanisms on oxides, clay minerals and soils inferred from ionic strength effects. **Soil Science Society of America Journal**. v.57. p. 704–708. 1993.

GÓMEZ-ARMESTO, A., et al. Copper content and distribution in vineyard soils from Betanzos (A Coruña, Spain). **Spanish Journal of Soil Science**. v.5. p. 60–71. 2015.

GOYA, J. F., FRANGI, J. L., TEA, F. D. Decomposition and nutrient release from leaf litter in *Eucalyptus grandis* plantations on three different soils in Entre Ríos, Argentina. **Ecology**. v. 29. p. 217–226. 2008.

GROBELAK, A., PLACEK, A., GROSSER, A., SINGH, B. R., ALMÁS, Á. R., NAPORA, A., KACPRZAK, M. Effects of single sewage sludge application on soil phytoremediation. **Journal of Cleaner Production**. v.155. p.189–197. 2016.

GUERRA, J., GAYOSO, J., SCHLATTER, J., & NESPOLO, R. Análisis de la biomasa de raíces en diferentes tipos de bosques: Avances en la evaluación de *Pinus radiata* en Chile. **Bosque (Valdivia)**, v. 26. p. 5-21. 2005.

HEIJDEN, M. G. A. VAN DER, MARTIN, F. M., SANDERS, I. R. Tansley review Mycorrhizal ecology and evolution : the past, the present, and the future. **New Phytologist**. v. 205. p. 1406 –1423. 2015.

HELMISAARI, H. S., DEROME, J., NOJD, P., KUKKOLA, M. Fine root biomass in relation to site and stand characteristics in Norway spruce and Scots pine stands. **Tree Physiology**. v. 27. p.1493–1504. 2007. doi: 10.1093/treephys/27.10.1493.

HERNANDEZ-SORIANO, M. C., PEÑA, A., MINGORANCE, M. D. Soluble metal pool as affected by soil addition with organic inputs. **Environmental Toxicology and Chemistry**. v. 32. p.1027–1032. 2013,

INEGI. **Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos** [Internet]. Aquixtla: Aquixtla, Puebla. p. 9. 2009.

JACOBSON, S., KUKKOLA, M., MÄLKÖNEN, E., TVEITE, B. Impact of whole-tree harvesting and compensatory fertilization on growth of coniferous thinning stands. **Forest Ecology and Management**. v. 129. p. 41–51. 2000.

JANDL, R., KOPESZKI, H., BRUCKNER, A., HAGER, H. Forest soil chemistry and mesofauna 20 years after an amelioration fertilization. **Restoration Ecology**. v.11. p. 239–246. 2003.

JANUSZA, G., PAWLIKA, K., MAGDALENA, S. A. P. J. Fungal laccase, manganese peroxidase and lignin peroxidase: Gene expression and regulation. **Enzyme and Microbial Technology**. v. 52. p. 1–12. 2013.

JONCZAK, J. Effect of land use on the carbon and nitrogen forms in humic horizons of Stagnic Luvisols. **Leœne Prace Badawcze**. v. 73. p.143–151. 2012.

JORGE, L. A. DE C., RODRIGUES, A. F. DE O. Safira: Sistema de Análise de Fibras e Raízes. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. São Carlos: EMBRAPA; 2008. p. 21.

JOURDAN, C. Root System Architecture and Gravitropism in the Oil Palm. **Annals of Botany**. v. 85. p. 861–868. 2000. doi: 10.1006/anbo.2000.1148

KANERVA, S., KITUNEN, V., LOPONEN, J., SMOLANDER, A. Phenolic compounds and terpenes in soil organic horizon layers under silver birch, Norway spruce and Scots pine. **Biology and Fertility of Soils**. v. 44. p. 547–556. 2008.

KASPARI, M., GARCIA, M. N., HARMS, K. E., SANTANA, M., WRIGHT, S. J., YAVITT, J. B. Multiple nutrients limit litterfall and decomposition in a tropical forest. **Ecology Letters**. v. 11. p. 35–43. 2008.

KERNDORFF, H., SCHNITZER, M. Sorption of metals on humic acid. **Geochimica et Cosmochimica Acta**. v. 44. p. 1701–1708.1980.

KISER, L. C., FOX, T. R., CARLSON, C. A. Foliage and litter chemistry, decomposition, and nutrient release in *Pinus taeda*. **Forests**. v. 4. p. 595–612. 2013. doi: 10.3390/f4030595.



- KOIDE, R. T., FERNANDEZ, C. W., PEOPLES, M. S. Can ectomycorrhizal colonization of *Pinus resinosa* roots affect their decomposition? **New Phytologist**. v. 191. p. 508–514. 2011. doi: 10.1111/j.1469-8137.2011.03694.x.
- KRISHNA, M. P., MOHAN, M. Litter decomposition in forest ecosystems: a review. **Energy, Ecology and Environment**. v. 2. p. 236–249. 2017. DOI: 10.1007/s40974-017-0064-9.
- LÁZARO-DZUL, M. O., et al. Fertilization with nitrogen, phosphorus and potassium in *Pinus patula* Schl. et cham samplings. **Revistas Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**. v.18. p. 33–42. 2012.
- LEHTO, T. Effects of soil pH and calcium on mycorrhizas of *Picea abies*. **Plant Soil**. v.163. p. 69–75. 1994.
- LEHTO, T. Boron retention in limed forest mor. **Forest Ecology and Management**. v. 78. p. 11–20. 1995.
- LEÓN-SÁNCHEZ, M. A., REYES-POZO, J. L., HERRERO-ECHEVARRÍA, G., PÉREZ-LEÓN, V. E. The effect of fertilization on growth, in diameter and height, of *Pinus caribaea* in plantations of western Cuba. **Madera y Bosques**. v. 22. p.87–101. 2016.
- LIN, H., HE, Z., HAO, J., TIAN, K., JIA, X., KONG, X., AKBAR, S., BEI, Z., TIAN, X. Effect of N addition on home-field advantage of litter decomposition in subtropical forests. **Forest Ecology and Management**. v. 398. p. 216–225. 2017.
- LINDSAY, W. L. **Chemical equilibria in soils**. Wilard. New York: John Wiley & Sons; 1979.
- LONDERO, E. K., SCHUMACHER, M. V., SZYMCZAK, D. A., VIERA, M. Exportação e reposição nutricional no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L. em área de segunda rotação. **Ciência Florestal**. v. 21. p. 487–497. 2011.
- LOPES, A. S., COX, F. R. A Survey of the Fertility Status of Surface Soils under “Cerrado” Vegetation in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**. v. 41. p. 742–747. 1977.
- LOPES, V. G., SCHUMACHER, M. V., CALIL, F. N., VIERA, M., WITSCHORECK, R. *Pinus taeda*. **Ciência Florestal**. v. 20. p. 569–578. 2010.
- LOPES, V. G., SCHUMACHER, M. V., CALIL, F. N., et al. Fine root quantification in a *Pinus taeda* L. stand and in grassland area in Cambará do Sul (RS). **Ciência Florestal**. v. 20. p. 569–578. 2010.
- LOPES, V. G., SCHUMACHER, M. V., MÜLLER, I., CALIL, F. N., WITSCHORECK, R., LIBERALESSO, E. Physical and chemical soil variables affecting *Pinus taeda* L. fine roots distribution in northeast of Rio Grande do Sul, Brazil. **Ecologia e Nutrição Florestal**. v.1. p. 14–23. 2013.

LOPEZ-ESCOBAR, N. F., et al. Reservoirs and nutrient dynamics in two stands of *Pinus montezumae* Lamb. in Tlaxcala, Mexico. **Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**. v. 24. p. 115–129. 2017.

LU, N., YU, M., CUI, M., et al. Effects of different ectomycorrhizal fungal inoculates on the growth of *Pinus tabulaeformis* seedlings under greenhouse conditions. **Forests**. v. 7. p.1–14. 2016. doi: 10.3390/f7120316.

MAGGARD, A. O., WILL, R. E., WILSON, D. S., MEEK, C. R., VOGEL, J. G. Fertilization reduced stomatal conductance but not photosynthesis of *Pinus taeda* which compensated for lower water availability in regards to growth. **Forest Ecology and Management**. v. 381. p. 37–47. 2016.

MAGGARD, A. O., WILL, R. E., WILSON, D. S., MEEK, C. R., VOGEL, J. G. Fertilization can compensate for decreased water availability by increasing the efficiency of stem volume production per unit of leaf area for loblolly pine (*Pinus taeda*) stands. **Canadian Journal of Forest Research**. v. 47. p. 445–457. 2017.

MANAVALAN, T., MANAVALAN, A., HEESE, K. Characterization of Lignocellulolytic Enzymes from White-Rot Fungi. **Current Microbiology**. v. 70. p. 485–498. 2015.

MARSCHNER, B., WILCZYNSKI, A. W. The effect of liming on quantity and chemical composition of soil organic matter in a pine forest in Berlin, Germany. **Plant and Soil**. v. 137. p. 229–236. 1991.

MARSCHNER, H. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants** [Internet]. 3a. Marschner P, organizador. Sch. Agric. Food Wine, Univ. Adelaide/Australia. London: Elsevier Ltd; 2012.

MARTINS, A. P. L., REISSMANN, C. B. Material Vegetal e as Rotinas Laboratoriais nos Procedimentos Químico-Analíticos. **Scientia**. v. 8. p. 1–17. 2007.

MATEIRĆ, D., BLENKHORN, D., et al. Monoterpene emission from young scots pine may be influenced by nutrient availability. **Applied Ecology and Environmental Research**. v. 14. p. 667–681. 2016.

MEIER, I. C., FINZI, A. C., PHILLIPS, R. P. Root exudates increase N availability by stimulating microbial turnover of fast-cycling N pools. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 106. p. 119–128. 2017.

MERRITT, K. A., ERICH, M. S. Influence of organic matter decomposition on soluble carbon and its copper-binding capacity. **Journal of environmental quality**. v. 32. p. 2122–2131. 2003.

MINEROPAR. **Mapa Geológico do estado do Paraná: Unidades Estratigráficas** [Internet]. p. 21–22. 2010.

MORO, L., GATIBONI, L. C., SIMONETE, M. A., CASSOL, P. C., CHAVES, D. M. Response of one-, five-, and nine-year-old *Pinus taeda* to NPK fertilization in southern brazil. **Brazilian Journal of Soil Science**. v. 38. p. 1181–1189. 2014.

MOTTA, A. C. V., BARBOSA, J. Z., CONSALTER, R., REISSMANN, C. B. Nutrição e Adubação da Cultura de Pínus. In: Prado R de M, Wadt PGS (eds) **Nutrição e adubação de espécies florestais e palmeiras**, 1st edn. FUNEP, Jaboticabal, pp 383–426. 2014.

MUNHOZ, J. S. B. **Caracterização da produtividade florestal e dos padrões de crescimento de *Pinus taeda* L. no sul do Brasil através de análise de tronco**. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - ESALQ, USP, Piracicaba, 2011. doi:10.11606/D.11.2011.tde-28042011-162045.

NASCIMENTO, F. A. F. DO, DIAS, A. N., FIGUEIREDO FILHO, A., MIRANDA, G. DE M., ARCE, J. E. Sistema de crescimento e produção para povoamentos de *Pinus taeda* na região norte de Santa Catarina. **Cerne**. v. 21. p. 235–242. 2015.

NELSON, A. S., BRAGG, D. C. Multidecadal response of naturally regenerated southern pine to early competition control and commercial thinning. **Forest Science**. v. 62. p.115–124. 2016.

NGUYEN, T. X. T., AMYOT, M., LABRECQUE, M. Differential effects of plant root systems on nickel, copper and silver bioavailability in contaminated soil. **Chemosphere**. v. 168. p. 131–138. 2017.

OSTONEN, I., PÜTTSEPP, Ü., et al. Specific root length as an indicator of environmental change. **Plant Biosystems**. v. 141. p. 426–442. 2007.

PACÉ, M., FENTON, N. J., PARÉ, D., BERGERON, Y. Ground-layer composition affects tree fine root biomass and soil nutrient availability in jack pine and black spruce forests under extreme drainage conditions. **Canadian Journal of Forest Research**. v. 47. p. 433–444. 2016.

PAVAN, M. A., CORREA, A. E. Reações de equilíbrio solo-boro. **Pesquisa agropecuária brasileira**. v. 23. p. 261–269. 1988.

PEGORARO, R. F., DA SILVA, I. R., et al. Fluxo difusivo e biodisponibilidade de zinco, cobre, ferro e manganês no solo: Influência da calagem, textura do solo e resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 30. p. 859–868. 2006.

PEHLIVAN, E., ARSLAN, G. Uptake of metal ions on humic acids. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**. v. 28. p. 1099–1112. 2006.

PÉRTILE, P., ALBUQUERQUE, J. A., GATIBONI, L. C., COSTA, A. DA, WARMLING, M. I. Application of alkaline waste from pulp industry to acid soil with pine. **Brazilian Journal of Soil Science**. v. 36. p. 939–950. 2012.

PEUKE, A. D., JESCHKE, W. D., HARTUNG, W. Flows of elements, ions and abscisic acid in *Ricinus communis* and site of nitrate reduction under potassium limitation. **Journal of Experimental Botany**. v. 53. p. 241-50. 2002.

PINNO, B. D., LIEFFERS, V. J., LANDHÄUSSER, S. M. Inconsistent Growth Response to Fertilization and Thinning of Lodgepole Pine in the Rocky Mountain Foothills is linked to Site Index. **International Journal of Forestry Research**. p. 1–7. 2012.

PIOVESAN, G., SCHUMACHER, M. V., VIERA, M., LOPES, V. G., WELTER, C. Deposição de serapilheira em povoamento de Pinus. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v. 42. p. 206–2011. 2012.

PRAVEEN, K., USHA, K. Y., VISWANATH, B., RAJASEKHAR REDDY, B. Kinetic properties of manganese peroxidase from the mushroom *Stereum ostrea* and its ability to decolorize dyes. **Journal of Microbiology and Biotechnology**. v. 22. p. 1540–1548. 2012.

PRIMICIA, I., IMBERT, J. B., TRAVER, M. C., CASTILLO, F. J. Inter-specific competition and management modify the morphology, nutrient content and resorption in Scots pine needles. **European Journal of Forest Research**. v. 133. p. 141–151. 2014. doi: 10.1007/s10342-013-0753-7

QUESADA, T., PARISI, L. M., et al. Genetic control of growth and shoot phenology in juvenile loblolly pine (*Pinus taeda* L.) clonal trials. **Tree Genetics and Genomes**. v. 13. 2017.

RAMOS, S. J., FAQUIN, V., FERREIRA, R. M. A., JANICE, J. L. A., DE CARVALHO, G. Crescimento e teores de boro em plantas de eucalipto (*Eucalyptus citriodora*) cultivadas em dois Latossolos sob influência de doses de boro e disponibilidade de água. **Revista Árvore**. v. 33. p. 57–65. 2009.

REISSMAN, C. B., ZÖTTL, H. W. Problemas nutricionais em povoamentos de *Pinus taeda* em áreas do arenito da formação Rio Bonito-Grupo Guatá. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**. p. 75–80. 1987.

REISSMANN, C. B., WISNIEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de Pinus. In: Gonçalves JLM B V, organizador. **Nutrição e fertilização florestal**. 3º ed Piracicaba: IPEF. p. 135–166. 2015.

REVELLE, W. **Procedures for Personality and Psychological Research** [Internet]. Evanston, Illinois: Northwestern University; 2017.

RODRÍGUEZ-ROBLES, U., ARREDONDO, T., HUBER-SANNWALD, E., et al. Application of geophysical tools for tree root studies in forest ecosystems in complex soils. **Biogeosciences Discuss**. p. 1–22. 2017. doi: 10.5194/bg-2017-91

RODRIGUES, C. M. **Efeito da aplicação de resíduo da indústria de papel e celulose nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, na nutrição e biomassa do *Pinus taeda* L.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 109p. 2004.

ROSAS-PATIÑO, G., PUENTES-PÁRAMO, Y. J., MENJIVAR-FLORES, J. C. Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la

Amazonia colombiana. **Corpoica Ciência e Tecnologia Agropecuaria**. v. 18. p. 529–541. 2017.

ROSOLEM, C. A., MATEUS, G. P., GODOY, L. J. G., FELTRAN, J. C., BRANCALIÃO, S. R. Morfologia radicular e suprimento de potássio às raízes de milho de acordo com a disponibilidade de água e potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 27. p. 875–884. 2003.

ROWLEY, M. C., GRAND, S., VERRECCHIA, É. P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. **Biogeochemistry**. v. 137. p. 27–49. 2018.

ROY, E. D., RICHARDS, P. D., et al. The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**. v. 2. p. 2–7. 2016.

SARDANS, J., ALONSO, R., et al. Foliar and soil concentrations and stoichiometry of nitrogen and phosphorus across European *Pinus sylvestris* forests: Relationships with climate, N deposition and tree growth. **Functional Ecology**. v. 30. p. 676–689. 2016.

SARDANS, J., RODÀ, F., PENUELAS, J. Phosphorus limitation and competitive capacities of *Pinus halepensis* and *Quercus ilex* subsp. *rotundifolia* on different soils. **Plant Ecology**. v. 174. p. 305–317. 2004. doi: 10.1023/B:VEGE.0000049110.88127.a0

SAMUELSON, L. J., JOHNSEN, K., STOKES, T. Production, allocation, and stemwood growth efficiency of *Pinus taeda* L. stands in response to 6 years of intensive management. **Forest Ecology and Management**. v. 192. p. 59–70. 2004.

SAYER, M. A. S., GOELZ, J. C. G., et al. Long-term trends in loblolly pine productivity and stand characteristics in response to thinning and fertilization in the West Gulf region. **Forest Ecology and Management**. v. 192. p. 71–96. 2004.

SCHUMACHER, M. V., VIERA, M., WITSCHORECK, R. Litter production and nutrients transfer in a second rotation area with *Pinus taeda* L. forest in Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**. v. 18. p. 471–480. 2008.

SCOTT, D. A., BLISS, C. M. Phosphorus fertilizer rate, soil P availability, and long-term growth response in a loblolly pine plantation on a weathered Ultisol. **Forests**. v. 3. p. 1071–1085. 2012.

SHARMA, S., ADAMS, J. P., SCHULER, J. L., FICKLIN, R. L., BRAGG, D. C. Effect of seedling stock on the early stand development and physiology of improved loblolly pine (*Pinus taeda* L.) seedlings. **IForest**. v. 9. p. 690–695. 2016.

SHEPARD, J. P., MITCHELL, M. J. Nutrient cycling in a red pine plantation thirty-nine years after potassium fertilization. **Soil Science Society of America Journal**. v. 54. p. 1433–1440. 1990.

SELOSSE, M. A., RICHARD, F., HE, X., SIMARD, S. W. Mycorrhizal networks: des liaisons dangereuses? **Trends in Ecology and Evolution**. v. 21. p. 621–628. 2006.

SIXEL, R. M. DE M., ARTHUR, J. C., et al. Sustainability of wood productivity of *Pinus taeda* based on nutrient export and stocks in the biomass and in the soil. **Brazilian Journal of Soil Science**. v. 39. p. 1416–1427. 2015.

SIMS, T. Soil pH effects on the distribution and plant availability of manganese, copper, and zinc. **Soil Science Society of America Journal**. v. 50. p. 367–373. 1986.

SINGH, M., GUPTA, A., LAXMI, A. Striking the right chord: signaling enigma during root gravitropism. **Frontiers in Plant Science**. v. 8.p. 1–17. 2017. doi: 10.3389/fpls.2017.01304

SMITH, S. E., READ, D. **Mycorrhizal Symbiosis**, 3rd ed. Academic Press and Elsevier, London. 2008.

SIXEL, R. M. DE M., ARTHUR JUNIOR, J. C., et al. Sustainability of wood productivity of *Pinus taeda* based on nutrient export and stocks in the biomass and in the soil. **Brazilian Journal of Soil Science**. p. 1416–1427. 2015.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO - SBCS. **Fertilidade do Solo**. Editores. 1a. Editores, Novais RF, Víctor Hugo Alvarez V., Nairam Félix de Barros, Renildes Lúcio F. Fontes RBCJCL, organizadores. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007.

SONG, Y. Y., et al. Defoliation of interior Douglas-fir elicits carbon transfer and stress signalling to ponderosa pine neighbors through ectomycorrhizal networks. **Scientific reports**. v. 5, p. 8495, 2015.

STAAF, H., PERSSON, T., BERTILLS, U. **Resultat och slutsatser från Naturvårdsverkets försöksverksamhet**. STAAF, H., PERSSON, T., BERTILLS, U., organizador. Stockholm: Naturvårdsverkets förlag; 1996.

STANISLAWSKA-GLUBIAK, E., KORZENIOWSKA, J., KOCON, A. Effect of peat on the accumulation and translocation of heavy metals by maize grown in contaminated soils. **Environmental Science Pollution Research**. v. 2. p. 4706-4714. 2014. doi: 10.1007/s11356-014-3706-x

STEWART, B. A. **Advances in Soil Science** [Internet]. LAL, J. L. H. R., ROSE, C. W., SCHWERTMANN, U., STEWART, B. A., TINKER, P. B., WAGENET, R., VARON, B., organizadores. New York: Springer-Verlag; 1989.

SUDMEYER, R. A., SPEIJERS, J., NICHOLAS, B. D. Root distribution of *Pinus pinaster*, *P. radiata*, *Eucalyptus globulus* and *E. kochii* and associated soil chemistry in agricultural land adjacent to tree lines. **Tree physiology**. v. 24. p. 1333–1346. 2004.

SUN, O. J., PAYN, T. I. M. W. Magnesium nutrition and photosynthesis in *Pinus radiata*: clonal variation and influence of potassium. **Tree physiology**. v. 19. p. 535–540. 1999.



SYPERT, R. H. **Diagnosis of Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.) Nutrient Deficiencies by Foliar Methods**. Virginia Polytechnic Institute and State University; 2006.

TRABAQUINI, K., GALVÃO, L. S., FORMAGGIO, A. R., DE ARAGÃO, L. E. Soil, land use time, and sustainable intensification of agriculture in the Brazilian Cerrado region. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 189. p. 70. doi: 10.1007/s10661-017-5787-8.

TAIZ, L., ZEIGER, E., MØLLER, I. M., MURPHY, A. **Plant physiology and development**. Sinauer Associates. 2015.

TAN, W., LIANG, T., DU, Y., ZHAI, H. The distribution and species of Ca<sup>2+</sup> and subcellular localization of Ca<sup>2+</sup> and Ca<sup>2+</sup>-ATPase in grape leaves of plants treated with fluoroglycofen. **Pesticide Biochemistry and Physiology**. v. 143. p. 207–213. 2017.

TANGJANG, S., ARUNACHALAM, A., ARUNACHALAM, K., DEB, S. Litterfall, decomposition and nutrient dynamics in traditional agro- forestry systems of Northeast India. **International Journal of Ecology and Environmental Sciences**. v. 41. p. 43–53. 2015.

TRENTINI, C. P., CAMPANELLO, P. I., VILLAGRA, M., et al. Thinning of loblolly pine plantations in subtropical Argentina: Impact on microclimate and understory vegetation. **Forest Ecology and Management**. v. 384. p. 36–247. 2017. doi: 10.1016/j.foreco.2016.10.040

TREVISAN, E. **Classificação e Caracterização de Horizontes Orgânicos sob Povoamentos de *Pinnus taeda* L na Região de Ponta Grossa - PR -**. Universidade Federal do Paraná. 1992.

TRICHET, P., LOUSTAU, D., LAMBROT, C., LINDER, S. Manipulating nutrient and water availability in a maritime pine plantation: effects on growth, production, and biomass allocation at canopy closure. **Annals of Forest Science**. v. 65. p. 814–814. 2008.

TRICHET, P., BAKKER, M. R., et al. France: The Importance of Phosphorus as a Fertilizer. **Forest Science**. v. 55. p. 390–402. 2009.

UFOT, U. F., ITE, A. E., USOH, I. H., AKPANABIATU, M. I. Role of Some Metal Ions on Steady–state Kinetics of Engineered Wild–type and Manganese (II) Binding Site Mutants of Recombinant *Phlebia radiata* Manganese Peroxidase 3 (rPr-MnP3). **American Journal of Medical and Biological Research**, v. 4, p. 42-52. 2016.

VANGUELOVA, E. I., HIRANO, Y., et al. Tree fine root Ca/Al molar ratio - Indicator of Al and acidity stress. **Plant Biosystems**. v. 141. p. 460–480. 2007.

VANGUELOVA, E. I., NORTCLIFF, S., MOFFAT, A. J., KENNEDY, F. Morphology, biomass and nutrient status of fine roots of Scots pine (*Pinus sylvestris*) as



influenced by seasonal fluctuations in soil moisture and soil solution chemistry. **Plant and Soil**. v. 270. p. 233–247. 2005.

VANNINEN, P., MAKELA, A. Fine root biomass of Scots pine stands differing in age and soil fertility in southern Finland. **Tree Physiology**. v.19. p. 823–830. 1999.

VIERA, M., SCHUMACHER, M. V. Concentração e retranslocação de nutrientes em acículas de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**. v. 19. p. 375–382. 2009.

VIERA, M., SCHUMACHER, M. V. Teores e aporte de nutrientes na serapilheira de *Pinus taeda* L., e sua relação com a temperatura do ar e pluviosidade. **Revista Árvore**. v. 34. p. 85–94. 2010a. doi: 10.1590/S0100-67622010000100010

VIERA, M., SCHUMACHER, M. V. Monthly variation of litter deposition in *Pinus taeda* L. stand in native grass area in Cambará do Sul-RS. **Revista Arvore**. v. 34. p. 487–494. 2010b.

WANG, L., KATZENSTEINER, K., SCHUME, H., VAN LOO, M., GODBOLD, D. L. Potassium fertilization affects the distribution of fine roots but does not change ectomycorrhizal community structure. **Annals of Forest Science**. v. 73. p. 691–702. 2016.

WATZLAWICK, L. F., CALDEIRA, M. V. W., et al. Aboveground stock of biomass and organic carbon in stands of *Pinus taeda* L. **Cerne**. v. 19. p. 509–515. 2013.

WIGHTMAN, M. G., MARTIN, T. A., et al. Loblolly pine productivity and rater relations in response to throughfall reduction and fertilizer application on a poorly drained site in Northern Florida. **Forests**. v. 7. p. 214. 2016.

WILKS, P., MANAGER, N., OLSEN, P. **The Rabbit Island Biosolids Project**. v. 54. p. 33–36. 2009.

WILL, G. M. Nutrient deficiencies in *Pinus radiata* in New Zealand. **New Zealand Journal of Forestry Science**. v. 8. p. 4–14. 1978.

WINAGRASKI, E. **Dinâmica de ectomicorrizas em um plantio adulto de *Pinus taeda* submetido a adubação e calagem no município de Jaguariaíva, PR**. 68p. 2014.

WISNIEWSKI, C. **Variação estacional da deposição de serapilheira e nutrientes em povoamentos de *Pinus taeda* na região de Ponta Grossa-PR** [Internet]. Universidade Federal do Paraná; 1989.

XUE, J., KIMBERLEY, M. O., et al. Ecological impacts of long-term application of biosolids to a radiata pine plantation. **Science of the Total Environment**. v. 531. p. 233–240. 2015.

YANAI, R. D., PHILLIPS, R. P., ARTHUR, M. A., SICCAMI, T. G., HANE, E. N. Spatial and temporal variation in calcium and aluminum in northern hardwood forest floors. **Water, Air, and Soil Pollution**. v. 160. p.109–118. 2005.

ZADWORNÝ, M., MCCORMACK, M. L., MUCHA, J., REICH, P. B., OLEKSYN, J. Scots pine fine roots adjust along a 2000-km latitudinal climatic gradient. **New Phytologist**. v. 212. p. 389–399. 2016.

ZETTERBERG, T., OLSSON, B. A., LÖFGREN, S., HYVÖNEN, R., BRANDTBERG, P. O. Long-term soil calcium depletion after conventional and whole-tree harvest. **Forest Ecology and Management**. v. 369. p. 102–115. 2016.

ZHANG, Y., ZHOU, Z., YANG, Q. Genetic variations in root morphology and phosphorus efficiency of *Pinus massoniana* under heterogeneous and homogeneous low phosphorus conditions. **Plant Soil**. v. 364. p. 93–104. 2013. doi: 10.1007/s11104-012-1352-y

ZHAO, D., KANE, M., BORDERS, B., HARRISON, M. Long-term effects of site preparation treatments, complete competition control, and repeated fertilization on growth of slash pine plantations in the flatwoods of the southeastern United States. **Forest Science**. v. 55. p. 403–410. 2009.

ZHAO, D., KANE, M., et al. Maximum response of loblolly pine plantations to silvicultural management in the southern United States. **Forest Ecology and Management**. v. 375. p. 105–111. 2016.