

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAROLINA BENGHI PINTO

RELAÇÃO ENTRE ATRIBUTOS EDÁFICOS, CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO
DE *Pinus taeda* L. NO SUL DO BRASIL, SOB INFLUÊNCIA DA
FERTILIZAÇÃO

CURITIBA

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAROLINA BENGHI PINTO

RELAÇÃO ENTRE ATRIBUTOS EDÁFICOS, CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO
DE *Pinus taeda* L. NO SUL DO BRASIL, SOB INFLUÊNCIA DA
FERTILIZAÇÃO

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 Doutora em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Renato Marques

Curitiba

2020

Pinto, Carolina Benghi

Relação entre atributos edáficos, crescimento e nutrição de *Pinus taeda* L. no sul do Brasil, sob influência da fertilização. / Carolina Benghi Pinto - Curitiba, 2020.

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

Orientador: Renato Marques.

1. Pinus taeda - Brasil, Sul. 2. Produtividade. 3. Solos - Características físicas. I. Marques, Renato. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO -
40001016014P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **CAROLINA BENGHI PINTO** intitulada: **RELAÇÃO ENTRE ATRIBUTOS EDÁFICOS, CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DE *Pinus taeda* L. NO SUL DO BRASIL, SOB INFLUÊNCIA DA FERTILIZAÇÃO**, sob orientação do Prof. Dr. RENATO MARQUES, que após terem inquirido a aluna e realizada 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, 25 de Setembro de 2020.

Assinatura Eletrônica
25/09/2020 18:02:28.0
RENATO MARQUES
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
28/09/2020 11:02:13.0
MAURO VALDIR SCHUMACHER
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA)

Assinatura Eletrônica
25/09/2020 18:10:05.0
JAMES STAHL
Avaliador Externo (KLABIN S.A/FATEB)

Assinatura Eletrônica
25/09/2020 17:58:23.0
JAIRO CALDERARI DE OLIVEIRA JUNIOR
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
25/09/2020 18:05:17.0
ALESSANDRO CAMARGO ANGELO
Avaliador Externo (UFPR / DEPARTAMENTO CIÊNCIAS FLORESTAIS)

*À memória dos meus pais, Wilson e
Marlene, referências da minha vida,
dedico este trabalho com muito
carinho*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Renato Marques pelos 20 anos da nossa grande amizade e pela orientação neste trabalho de pesquisa.

Aos Professores Jairo Calderari de Oliveira Junior e Carlos Bruno Reissmann, sempre solícitos com as minhas demandas, pela amizade e coorientação do trabalho.

À Professora e amiga Kauana Melissa Cunha Dickow pelos momentos de descontração e trocas científicas.

Ao Professor Mauro Valdir Schumacher pelo grande incentivo e amizade.

Ao IPEF por me oferecer a oportunidade e apoio para trabalhar no Programa Cooperativo sobre Pesquisa do *Pinus* no Brasil – PPPIB, especialmente à Engenheira Florestal Isabel Deliberali por sua atenção, dedicação e amizade.

Às empresas florestais que integram o PPPIB e seus colaboradores pelo suporte necessário para a realização das coletas e trabalhos de campo.

A CAPES pela bolsa de estudo concedida.

Aos amigos Cris, Fran, Jonas, Hilbert, Everaldo e especialmente ao meu amigão Cilmar pelas conversas temperadas de humor e ciência.

Às amigas Engenheiras Florestais Mariangela e Rosana pelas nossas vivências e trocas de conhecimento “socioambiental” que serviram de base para o início desta pesquisa.

A todos os professores e funcionários do DESEA, pelo convívio e amizade, em especial às laboradoras Fabi, Carla, Maria e Jô e às secretárias Denise e Marla pelo carinho, e apoio para o desenvolvimento desta pesquisa.

A toda minha família, pelo apoio e amor, e principalmente à minha mãe Marlene que me ensinou a acreditar que tudo sempre dará certo no final.

Enfim, a todos que de uma forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho, MUITO OBRIGADA!

*“A sabedoria da natureza é tal
que não produz nada de
supérfluo ou inútil.”*

(Nicolau Copérnico)

RESUMO GERAL

Esta pesquisa é fruto do Programa Cooperativo sobre Pesquisa do *Pinus* no Brasil (PPPIB) desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) e empresas florestais no sul do Brasil, e visa contribuir para a compreensão dos processos que controlam a produtividade de *Pinus* sob diferentes condições edáficas e de manejo da fertilidade do solo. Para tanto, a tese foi estruturada em 3 capítulos com os seguintes objetivos gerais: *i*) Identificação dos atributos edafoclimáticos relacionados com a produtividade do *Pinus taeda*; *ii*) Avaliação dos efeitos da fertilização e de diferentes extratores para caracterização de P, K, Ca e Mg e a correlação com a produtividade florestal; *iii*) Avaliação dos teores de nutrientes nos tecidos vegetais do *Pinus taeda* e a relação com os teores de nutrientes no solo e a produtividade florestal. As parcelas de estudo localizam-se em povoamentos florestais nos estados do Paraná e Santa Catarina. Quatorze perfis de solo foram analisados para a caracterização morfológica e físico-química, e classificados segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Para avaliar o efeito da fertilização foram coletadas amostras de solo nas parcelas dos tratamentos fertilizado e não fertilizado nas profundidades 0-10 e 10-20 cm. Foram determinados os seguintes atributos químicos do solo: P e K (Mehlich I), Al, Ca e Mg (KCl), pH CaCl₂, acidez potencial (H+Al); P, K, Ca e Mg (extrator ácido cítrico a 1%); análise dos elementos totais no solo (EPA 3052) para P e K, e pseudototais (EPA 3051) para Ca e Mg. N e C foram determinados por combustão total. Visando a caracterização dos teores de nutrientes nos tecidos vegetais foram coletadas amostras de lenho e acículas verdes. Para análise de nutrientes no lenho foi realizada a digestão em micro-ondas; e para as acículas foram realizadas as digestões sulfúrica e nitroperclórica. Dados dendrométricos (índice de sítio, volume, incremento médio anual) foram obtidos através dos inventários florestais realizados anualmente. O atributo do solo que apresentou a melhor correlação com a produtividade foi o teor de argila. As metodologias de análise de rotina e extração pelo ácido cítrico a 1% apresentaram correlação positiva para K, Ca e Mg. Não ocorreu aumento significativo em termos de produtividade após a fertilização das parcelas, mas foram observados efeitos residuais para Ca no solo na profundidade de 0 a 10 cm, tanto nos teores trocáveis como nos teores pseudototais. As amostras do lenho revelaram aumento significativo nos teores de Ca e Mg após a calagem. Foi constatada correlação positiva significativas entre os teores de K, Ca e Mg do lenho e os teores destes nutrientes do solo, porém não foi identificada correlação entre os teores de nutrientes nos tecidos vegetais e a produtividade do *Pinus taeda*.

Palavras chave: *Pinus taeda*, produtividade, atributos do solo, fertilização, ácido cítrico, EPA 3051, EPA 3052, tecidos vegetais, nutrientes

ABSTRACT

This research is part of the Cooperative Program on Pinus Research in Brazil (PPPIB) coordinated by the Forest Research and Studies Institute (IPEF) in forestry companies in southern Brazil, and aims to contribute to the understanding of the processes that control productivity of *Pinus* under different soil conditions and soil fertility management. For that, the thesis was structured in 3 chapters with the following general objectives: i) Identification of the edaphoclimatic attributes related to the productivity of *Pinus taeda*; ii) Evaluation of the effects of fertilization and different extractors to characterize P, K, Ca and Mg and the correlation with forest productivity; iii) Evaluation of the nutrient contents in the wood and in the needles of *Pinus taeda* and their relationship with the soil characteristics and productivity. The study plots were located in forest stands in the states of Paraná and Santa Catarina. Fourteen soil profiles were analyzed for morphological and physical-chemical characterization; and classified according to the Brazilian Soil Classification System. For the evaluation of the fertilization effect soil samples were collected in the fertilized and unfertilized treatments at depths 0-10 and 10-20 cm. The following chemical attributes of the soil were determined: P and K (Mehlich I), Al, Ca and Mg (KCl), pH CaCl₂, potential acidity (H + Al); P, K, Ca and Mg (1% citric acid extractor); analysis of total elements in the soil (EPA 3052) for P and K, and pseudototals (EPA 3051) for Ca and Mg. N and C were determined by total combustion. In order to characterize the levels of nutrients in plant tissues, samples of wood and green needles were collected. Microwave digestion was carried out to analyze nutrients in the wood; and for the foliar analysis sulfuric and nitroperchloric digestions were performed. Dendrometric data (site index, volume, average annual increment) were obtained through forest inventories carried out annually. The soil attribute that showed the best correlation with productivity was the clay content. The methodologies of routine analysis and extraction by 1% citric acid showed a positive correlation for K, Ca and Mg. There was no significant increase in terms of productivity after the fertilization of the plots. However, residual effects for Ca in the soil were observed at a depth of 0 to 10 cm, for both exchangeable and pseudototal levels. The wood samples showed a significant increase in Ca and Mg contents after liming. Significant positive correlations were found between the contents of K, Ca and Mg in the wood and the contents of these nutrients in the soil, but no correlation was found between the levels of nutrients in plant tissues and the productivity of *Pinus taeda*.

Keywords: *Pinus taeda*, productivity, soil attributes, fertilization, citric acid, EPA 3051, EPA 3052, plant tissues, nutrients

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	12
2	MATERIAL E MÉTODOS GERAL	15
2.1	Localização e geologia das parcelas de estudo	15
2.2	Dados climáticos.....	17
2.3	Solos	18
2.4	Dados de produtividade.....	34
3	REFERÊNCIAS	35
4	CHAPTER I: Relationship between edaphoclimatic attributes and productivity of loblolly pine in southern Brazil	43
4.1	ABSTRACT.....	43
4.2	INTRODUCTION	44
4.3	MATERIAL AND METHODS	45
4.3.1	Forest plots characteristics.....	45
4.3.2	Soil classification and soil chemical and physical characteristics.....	47
4.3.3	Statistical analyses	48
4.4	RESULTS	48
4.4.1	Soil attributes	48
4.4.2	Relationship between soil attributes and forest productivity	50
4.4.3	Relationships between carbon stock, clay, soil depth and productivity	54
4.5	DISCUSSION	54
4.5.1	Soil attributes	55
4.5.2	Relationship between edaphoclimatic attributes and forest productivity.....	56
4.6	CONCLUSIONS	58
4.7	REFERENCES.....	58
5	CAPÍTULO II: Relações entre adubação, teores de P, K, Ca e Mg avaliados com diferentes extratores e produtividade do <i>Pinus taeda</i> ...	67
5.1	RESUMO	67
5.2	INTRODUÇÃO	69
5.3	MATERIAL E MÉTODOS	72
5.3.1	Caracterização da área de estudo	72
5.3.2	Coleta de solo	73

5.3.3	Análises de solo	74
5.3.4	Análises estatísticas	75
5.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
5.4.1	Efeito da fertilização sobre os teores de P, K, Ca e Mg no solo	76
5.4.2	Correlações entre as metodologias de extração de nutrientes do solo	77
5.4.3	Avaliação da fertilização sobre o crescimento das árvores e das relações entre os teores de P, K, Ca e Mg e a produtividade do <i>Pinus taeda</i>	83
5.5	CONCLUSÕES	87
5.6	REFERÊNCIAS	88
6	CAPÍTULO III: Composição nutricional foliar e da madeira de <i>Pinus taeda</i> e suas relações com a fertilidade do solo e a produtividade florestal ...	97
6.1	RESUMO	97
6.2	INTRODUÇÃO	99
6.3	MATERIAL E MÉTODOS	101
6.3.1	Caracterização da área de estudo	101
6.3.2	Coleta e análises de solo	101
6.3.3	Coleta e análise do material lenhoso	102
6.3.4	Coleta e análise das acículas maduras	103
6.3.5	Análises estatísticas	103
6.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	103
6.4.1	Teores de nutrientes nos tecidos vegetais e a relação com a produtividade	104
6.4.2	Relações entre teores de nutrientes no solo e nos tecidos vegetais ..	106
6.5	CONCLUSÕES	110
6.6	REFERÊNCIAS	110
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	116
8	REFERÊNCIAS	117
	APÊNDICE 1	136
	APÊNDICE 2	137
	APÊNDICE 3	138
	APÊNDICE 4	139

1 INTRODUÇÃO GERAL

O *Pinus taeda* é considerado uma das espécies florestais mais importantes para fins comerciais no cenário mundial (WILL et al., 2015). Esta espécie movimenta vários segmentos da indústria e é utilizada em diversos produtos como madeira serrada, laminada, chapas, celulose e papel, entre outros. A área reflorestada atinge atualmente cerca de 1,6 milhões de hectares, concentrando-se principalmente nos estados do Paraná (42%) e Santa Catarina (34%) (IBÁ, 2019).

Na atualidade, devido ao melhoramento genético e aprimoramento das práticas silviculturais, a produtividade média do *Pinus taeda* atingiu o valor de 30 m³ha⁻¹ano⁻¹ (IBÁ, 2019). Paralelamente, muitas empresas florestais têm reduzido as rotações dos plantios. A combinação de alta produtividade com rotações curtas representa uma elevação na exportação dos nutrientes dos solos plantados com esta espécie (PAIM, 2007), e no médio prazo este fato pode tornar-se preocupante no que se refere à manutenção da fertilidade e consequentemente produtividade destas áreas (GATIBONI et al., 2019).

Grande parte das empresas florestais no sul do Brasil não realiza práticas de adubação e calagem nas plantações com o *Pinus taeda*. Entretanto, algumas pesquisas mostram que as plantações com *Pinus* apresentam respostas positivas em termos de crescimento e nutrição quando recebem adubação mineral (ALBAUGH et al., 1998; SANCHES, 2000; IBAÑEZ et al., 2004; ALBAUGH et al., 2008; MORO et al., 2014; BATISTA et al., 2015; ALBAUGH et al., 2017) principalmente em sítios de baixa fertilidade natural. A aplicação de resíduos como lama de cal, cinza de caldeira e lodo de esgoto como forma de adubação também pode ser uma alternativa para a manutenção da produtividade do *Pinus* (BELLOTE et al., 1998; PAIM, 2007; RIGUEIRO-RODRIGUEZ et al., 2010; MAEDA; BOGNOLA, 2013). Áreas de plantio com *Pinus* que não receberam fertilização podem apresentar, após sucessivos ciclos de exploração, decréscimo de nutrientes no solo como Ca, Mg e K (ABRÃO et al., 2015; GATIBONI et al., 2019) e P (GATIBONI et al., 2017).

Contudo, existem poucos estudos focando as relações entre os atributos edáficos e a produtividade de *Pinus taeda*, sendo que parte deste contexto é explicado pela grande capacidade da espécie na utilização dos recursos

nutricionais em solos de baixa fertilidade, apresentando rápido crescimento (REISSMANN; WISNIEWSKI, 2000). O conhecimento das relações entre os atributos edáficos e a produtividade da espécie pode servir como base para a orientação de práticas de adubação e manejo. Algumas pesquisas envolvendo esta temática apontam que a produtividade do *Pinus* se relaciona positivamente com atributos químicos como CTC e saturação por bases; e físicos como argila e disponibilidade hídrica (RIGATTO et al., 2005; GOMES et al., 2007; CORREA; BELLOTE, 2011; MUNHOZ, 2011; 2015).

Nas análises químicas de fertilidade do solo é importante considerar o método analítico empregado. Extratores utilizados com frequência nos laboratórios de rotina de fertilidade de solo podem ser empregados com sucesso para estimativa da disponibilidade de nutrientes em áreas com cultivos agrícolas, porém nem sempre estimam adequadamente esta disponibilidade para espécies florestais. As espécies florestais possuem um longo ciclo de vida comparado às espécies agrícolas e interagem de forma diferente com os componentes orgânicos e minerais do solo, existindo a possibilidade de extração de outras formas de nutrientes (não trocáveis e estruturais), além da utilização imediata dos nutrientes da solução do solo (CALVARUSO et al., 2010; HASHIMOTO, 2011; ALVES, 2012). A simbiose entre *Pinus* e as ectomicorrizas (FILHO; KRUNGNER, 1982; GIACHINI et al., 2004; WINAGRASKI, 2014) é um processo que possibilita a solubilização de minerais pelos microorganismos, sendo associado à excreção de ácidos orgânicos que agem como agentes de dissolução, acelerando a liberação de nutrientes para a solução do solo (OLSSON et al., 2002, MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Estudos envolvendo o uso de ácido orgânico, como o ácido cítrico, para extrair nutrientes do solo (REISSMANN; ZOTTL, 1987; HASHIMOTO, 2011; AMARAL et al., 2015) e a análise de elementos da reserva do solo (não trocáveis e estruturais) (MELO et al., 1995; CASTRO et al., 2010; ALVES 2012; ALVES et al., 2013; AMARAL et al., 2015; AMARAL, 2016) têm mostrado correlações positivas entre os nutrientes extraídos por estas metodologias com a nutrição e produtividade das espécies florestais.

Para entender melhor as relações entre disponibilidade de nutrientes no solo e a produtividade de *Pinus*, é importante considerar o estado nutricional das árvores. Nesta temática, pesquisas apontam para teores de nutrientes que

seriam adequados nos tecidos vegetais do *Pinus* (REISSMANN; ZÖTTL, 1987; VALERI, 1987; LASO GARICOTIS, 1990; MENEGOL, 1991; VETORAZZO, 1994; LÚCIO et al., 2010; KASEKER, 2012; BARROS FILHO et al., 2017; VOGEL et al., 2018). Estes estudos representam situações específicas de plantações de *Pinus* no PR e RS e não englobam todas as situações geomorfológicas onde se planta *Pinus taeda* no Brasil. Outro fator a ser considerado é a dificuldade de coleta de material foliar devido à altura da copa das árvores, o que muitas vezes se torna um entrave para que produtores e empresas florestais adotem esta metodologia como ferramenta para avaliar o estado nutricional do *Pinus*. A realização de um diagnóstico nutricional feito em amostras de madeira coletadas nos troncos, sem a necessidade da derrubada das árvores, poderia ser uma metodologia alternativa de fácil execução no campo. A composição nutricional em anéis de crescimento da madeira de espécies florestais tem sido investigada (CHUN; HUI-YI, 1992; CUTTER; GUYETTE, 1993; RANGER et al., 1997; PENNINCKXET et al., 2001; HRISTOVSKI; MELOVSKI, 2010; DONHA, 2016) sem o enfoque de diagnóstico nutricional. Rodriguez et al. (2018) apontam que os anéis de crescimento das árvores são indicadores sensíveis de alterações químicas no solo. Neste sentido, a possibilidade de correlacionar teores de nutrientes na madeira do *Pinus taeda* com produtividade poderia contribuir para o avanço no diagnóstico nutricional da espécie.

No intuito de investigar os fatores que afetam a produtividade das florestas de *Pinus* no Brasil, foi criado o Programa Cooperativo sobre Pesquisa do *Pinus* no Brasil (PPPIB), conduzido pelo Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), principalmente em áreas de empresas florestais no Paraná e Santa Catarina. Esta pesquisa faz parte do PPPIB e visa dar continuidade às investigações relacionando os atributos edafoclimáticos com a nutrição e produtividade do *Pinus taeda*, trazendo contribuições adicionais para o melhor entendimento da dinâmica biogeoquímica nas plantações e sobre as demandas nutricionais desta espécie. Para tanto este estudo foi estruturado em três capítulos:

1. Relações entre atributos edafoclimáticos e a produtividade do *Pinus taeda* no sul do Brasil.
2. Relações entre adubação, teores de P, K, Ca e Mg avaliados com diferentes extratores e produtividade do *Pinus taeda*

3. Composição nutricional foliar e da madeira de *Pinus taeda* e suas relações com a fertilidade do solo e a produtividade florestal.

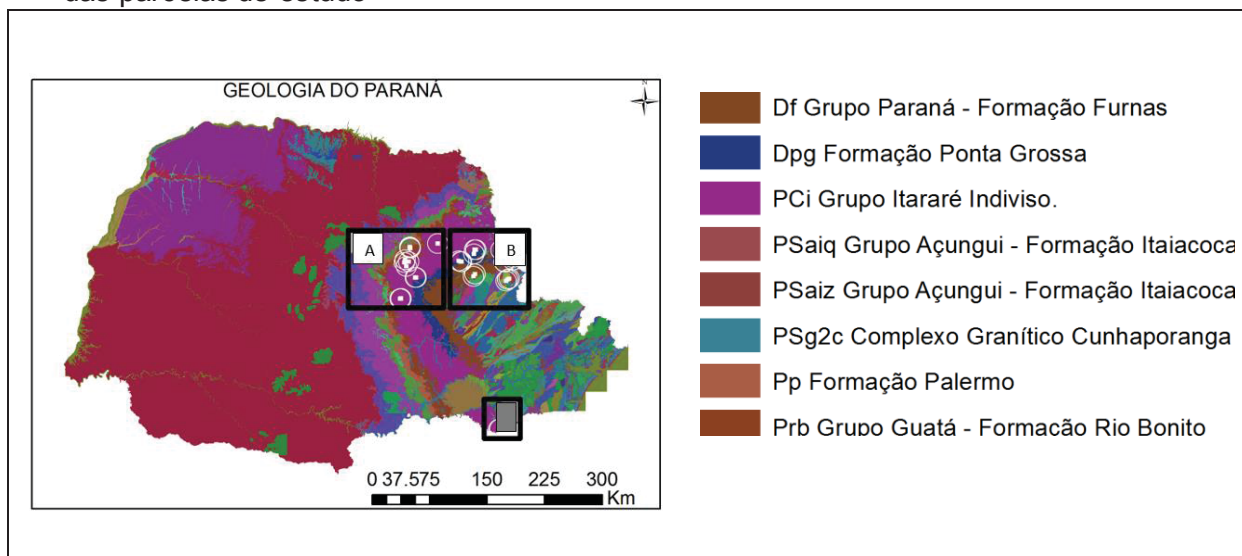
2 MATERIAL E MÉTODOS GERAL

2.1 Localização e geologia das parcelas de estudo

As quatorze parcelas de estudo situam-se em áreas de empresas florestais que integram o PPPIB nos estados do Paraná e Santa Catarina. A localização para abertura dos perfis de solo visando à classificação foi baseada em informações do banco de dados do IPEF (produtividade dos sítios, coordenadas geográficas e altitude das parcelas), e mapas de solos e geológicos da região de estudo. A Tabela 01 mostra a localização e geologia das parcelas de estudo.

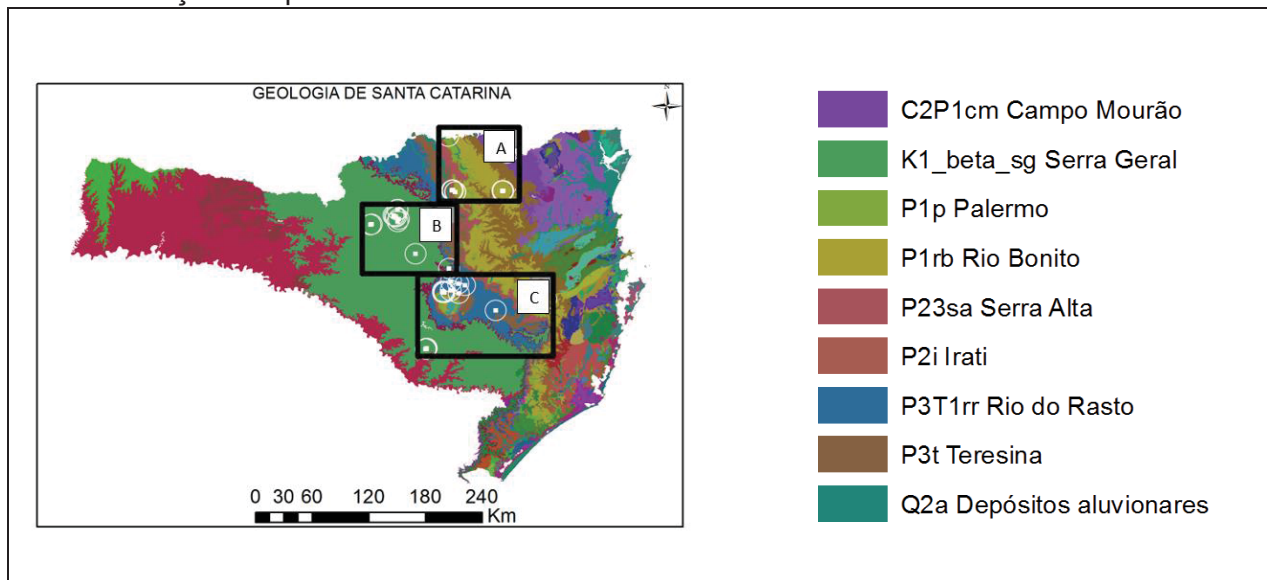
Os mapas geológicos com o posicionamento das parcelas de estudo (Figuras 01 e 02) foram obtidos utilizando-se o componente ArcMap do software de geoprocessamento ArcGIS e arquivos vetoriais baixados dos endereços eletrônicos do MINEROPAR (<http://www.mineropar.pr.gov.br>) e do Serviço Geológico do Brasil CPRM (<http://rigeo.cprm.gov.br>).

Figura 01 – Mapa geológico do estado Paraná (Escala 1:650.000) com a localização das parcelas de estudo



A) parcelas na região de Telêmaco Borba; B) parcelas na região Arapoti e Curiúva
(Fonte: adaptado de MINEROPAR, 2006).

Figura 02 - Mapa geológico do estado Santa Catarina (Escala 1:500.000) com a localização das parcelas de estudo



A) parcelas na região de Itaiópolis, Mafra e Rio Negrinho; B) parcelas na região de Lébon Régis e Rio das Antas; C) parcelas na região de Palmeira, Otácilio Costa e Ponte Alta do Norte
(Fonte: adaptado de CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2014).

Tabela 01 – Geologia e localização das parcelas de estudo

*Formação Geológica/Material de origem	Parcela	Coordenadas	Altitude (m)
Grupo Guatá/Formação Rio Bonito. Paleozóica: arenitos, siltitos	SC.A2	- 26,5628 - 49,7290	972
Grupo Itararé Indiviso. Paleozóica: folhelhos, argilitos arenitos, siltitos,	SC.A1	- 26,1938 - 49,5178	983
	PR.A3	-24,2735 -50,6042	783
	PR.A2	-24,2217 -50,5730	840
Grupo Paraná/Formação Ponta Grossa. Paleozóica/Devoniano: folhelhos e siltitos cinza escuros, muito micáceos	PR.B2	-24,0785 -49,8008	830
Grupo Paraná/Formação Furnas. Paleozóica/Devoniano: arenitos brancos, de granulação média a grossa, micáceos, feldspáticos, de matriz caulinitica	PR.B1	-24,2192 - 49,9661	756
Formação Rio do Rastro. Paleozóica: argilitos, argilitos sílticos, siltitos.	SC.C3	-27,5388 -50,1452	883
	SC.C2	-27,4634 -50,0857	880
Áreas com Influência de diques de diabásio (Grupo Itararé Indiviso)	PR.A1	-24,4073 -50,4961	779
Áreas com Influência de diques de diabásio (Formação Palermo)	PR.B3	-24,0448 -50,5611	720
	SC.B3	-26,8875 -50,9875	979
Serra Geral. Mesozóica: basaltos, dacitos	SC.B1	-26,7468 -50,7289	1279
	SC.B2	-26,8546 -50,7262	1126
	SC.C1	-27,1635 -50,5551	969

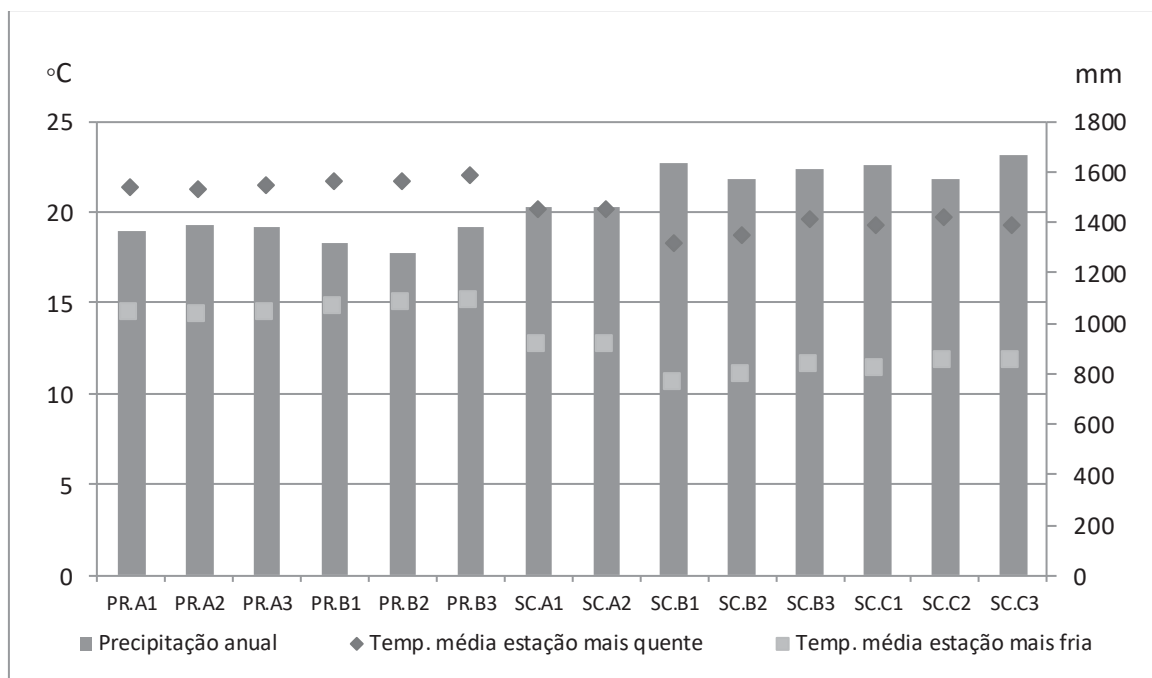
*Fonte: MINEROPAR (2006) e CPRM - Serviço Geológico do Brasil (2014).

2.2 Dados climáticos

O clima predominante nas áreas de estudo é o Cfb (Köppen), subtropical úmido com verão ameno, chuvas uniformemente distribuídas e sem estação seca, sendo a temperatura média do mês mais quente inferior a 22°C e a temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C, com ocorrência de geadas (ALVARES et al., 2013).

Os dados climáticos por parcela de estudo (Figura 03) foram obtidas do banco de dados Bioclim (FICK; HIJMANS, 2017).

Figura 03 - Variáveis meteorológicas das parcelas de estudo



2.3 Solos

Visando a classificação dos solos conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018), foram abertos perfis de solo próximos às parcelas florestais e amostras de solo foram coletadas em cada horizonte identificado nos perfis de estudo sendo a descrição morfológica dos perfis de solo realizada conforme IBGE (2015).

As análises químicas e físicas foram realizadas nos laboratórios do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da UFPR. Foram determinados os seguintes atributos químicos do solo: P e K (extrator Mehlich 1), Al, Ca e Mg trocáveis (extrator KCl 1mol L⁻¹), pH CaCl₂, acidez potencial (H+Al), conforme Marques e Motta (2003), N e C foram determinados por combustão total no Analisador Elementar Vario El III. Foram calculadas a capacidade de troca de cátions ou CTC a pH 7,0 (valor T), a soma de bases (valor S), a saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%). A análise granulométrica das

amostras foi realizada pelo método do densímetro de Bouyoucos (GEE;OR, 2002).

A fim de complementar as análises químicas, amostras de solo de dez parcelas foram encaminhadas para o laboratório da ESALQ/USP, visando a determinação dos valores K_i e K_r , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 e MnO (método do ataque sulfúrico).

As Figuras de 04 a 17 ilustram os perfis de solos analisados e classificados até o quarto nível categórico. As Tabelas de 02 a 15 mostram os resultados das análises física e química dos perfis de solo.

Figura 04 - Perfil de solo PR.A1 -Telêmaco Borba/PR



Descrição Morfológica do Perfil PR.A1

A: 0- 20 cm, vermelho-amarelado (5YR 5/6), muito argilosa, estrutura granular, forte, muito pequena, solta, plástica, ligeiramente pegajosa, transição difusa.

BA: 20-50 cm, bruno-avermelhado (2,5YR 4/4), muito argilosa, estrutura granular, forte, muito pequena solta, plástica, ligeiramente pegajosa, transição difusa.

Bw1: 50-120 cm, vermelho (2,5YR 4/6), muito argilosa, estrutura granular, forte, muito pequena solta, plástica, ligeiramente pegajosa, transição difusa.

Bw2: 120-190 cm⁺, vermelho (2,5YR 4/6), muito argilosa; estrutura granular, forte, muito pequena solta, plástica, ligeiramente pegajosa.

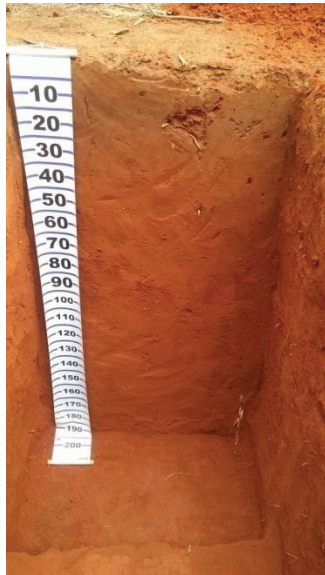
Classificação: LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico

Tabela 02 - Análise química e física do perfil PR.A1

Hor.	Prof. cm	Granulometria (g kg ⁻¹)			Dens. g cm ³	Silte Argila	C g dm ³	N g dm ³	P mg dm ³	C/N	M.O. g kg ⁻¹	
		Areia	Silte	Argila								
A	0-20	125	163	713	1,18	0,23	33,6	2,2	1,5	15,6	58,0	
BA	20-50	100	138	763	1,03	0,18	16,6	1,3	1,5	12,7	28,6	
Bw1	50-120	138	113	750	0,94	0,15	13,2	0,9	1,2	14,8	22,8	
Bw2	120-190	175	100	725	0,94	0,14	6,4	0,5	1,2	11,9	11,0	
Hor.	pH		Complexo sortivo (cmol _c dm ⁻³)							Valor T	Valor V(%)	Valor m(%)
	CaCl ₂	SMP	Ca	Mg	K	Na	Valor S	Al	H+Al			
A	3,78	4,34	0,39	0,20	0,10	0,00	0,69	2,56	16,30	16,99	4,09	78,67
BA	4,00	5,12	0,26	0,14	0,04	0,00	0,44	1,06	9,70	10,14	4,35	70,63
Bw1	4,17	5,42	0,26	0,14	0,03	0,00	0,43	0,65	5,80	6,23	6,91	60,15
Bw2	4,26	5,75	0,29	0,20	0,02	0,00	0,51	0,45	6,20	6,71	7,57	46,98

Horizonte	%					Valor Ki	Valor Kr
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO		
Bw1	13,7	25,76	10,2	2,6	0,02	0,9	0,76

Figura 05 – Perfil de solo PR.A2 - Telêmaco Borba/PR



Descrição Morfológica do Perfil PR.A2

A: 0-30 cm, vermelho-amarelado (5YR 4/6), franco argiloarenosa (média), estrutura granular, forte, muito pequena; solta, plástica, ligeiramente pegajosa, transição difusa.

BA: 30-50 cm; vermelho escuro (2,5 YR 3/6), franco argiloarenosa (média), estrutura granular, forte, muito pequena, solta, plástica, ligeiramente pegajosa, transição difusa

Bw: 50-190 cm⁺, Vermelho (2,5 YR 4/6), argiloarenosa (argiloso), estrutura granular, forte, muito pequena, solta, plástica, ligeiramente pegajosa.

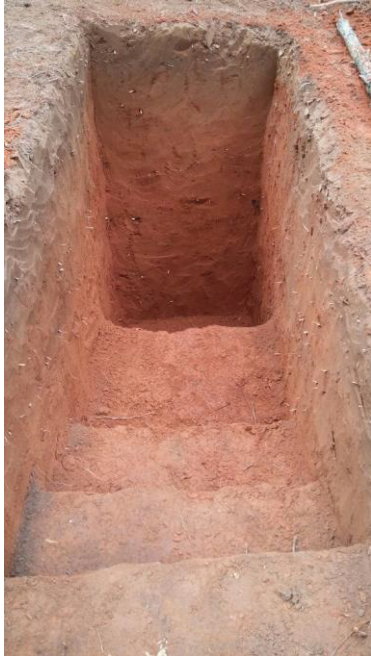
Classificação: LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico

Tabela 03 - Análise química e física do perfil PR.A2

Hor.	Prof. cm	Granulometria (g kg ⁻¹)			Dens. g cm ³	Silte Argila	C g dm ³	N g dm ³	P mg dm ⁻³	C/N	M.O. g kg ⁻¹	
		Areia	Silte	Argila								
A	0-30	488	188	325	1,47	0,58	11,7	0,8	0,9	14,1	20,2	
BA	30-50	463	188	350	1,36	0,54	8,8	0,6	0,9	14,8	15,1	
Bw	50-190 ⁺	488	138	375	1,36	0,37	4,9	0,4	0,9	13,7	8,5	
Hor.	pH		Complexo sortivo (cmol _c dm ⁻³)							Valor T	Valor V(%)	Valor m(%)
	CaCl ₂	SMP	Ca	Mg	K	Na	Valor S	Al	H+Al			
A	3,87	5,05	0,26	0,18	0,03	0,00	0,47	1,73	10,50	10,97	4,29	78,61
BA	3,88	5,34	0,23	0,12	0,02	0,00	0,36	1,14	8,40	8,76	4,11	75,98
Bw	4,08	5,93	0,25	0,12	0,01	0,00	0,38	0,68	5,40	5,78	6,58	64,14

Horizonte	%					Valor Ki	Valor Kr
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO		
Bw	9,5	15,13	3,97	1,34	-	1,07	0,96

Figura 06 - Perfil de solo PR.A3 - Telêmaco Borba/PR



Descrição Morfológica do Perfil PR.A3

A: 0-40 cm; vermelho amarelado (5YR 4/6); franca (média); estrutura granular, pequena, moderada, solta, plástica, ligeiramente pegajosa, transição gradual.

Bw: 40-90 cm; vermelho amarelado (5YR 5/8); franco argiloarenosa (média); estrutura granular, pequena, moderada, solta, plástica, ligeiramente pegajosa, transição difusa.

BC: 90-130 cm⁺; vermelho (2,5 YR 5/8); franco argiloarenosa (média); estrutura granular, pequena, moderada, solta, plástica, ligeiramente pegajosa.

Classificação: CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico latossólico

Tabela 04 - Análise química e física do perfil PR.A3

Hor.	Prof. cm	Granulometria (g kg ⁻¹)			Dens. g cm ⁻³	Silte Argila	C g dm ⁻³	N g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	C/N	M.O. g kg ⁻¹	
		Areia	Silte	Argila								
A	0-45	400	363	238	1,50	1,53	9,4	0,6	1,2	9,4	15,5	
Bw	45-90	550	150	300	1,42	0,50	4,7	0,4	0,5	4,7	12,1	
BC	90-130 ⁺	525	150	325	1,40	0,46	3,7	0,4	0,6	3,7	8,9	
Hor.	pH		Complexo sortivo (cmol _c dm ⁻³)							Val or T	Valor V(%)	Valor m(%)
	CaCl ₂	SMP	Ca	Mg	K	Na	Valor S	Al	H+Al			
A	4,07	5,50	0,21	0,12	0,02	0,00	0,36	1,48	7,20	7,56	4,71	80,63
Bw	3,98	5,91	0,20	0,12	0,02	0,00	0,34	0,85	5,40	5,74	5,85	71,71
BC	4,1	6,1	0,20	0,12	0,02	0,00	0,34	0,92	4,60	4,94	6,80	73,29

Horizonte	%					Valor Ki	Valor Kr
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO		
Bw	7,2	12,19	3,3	0,65	0,01	1	0,9

Figura 07 - Perfil de solo PR.B1 - Arapoti



Descrição Morfológica do Perfil PR.B1

A: 0-10 cm, bruno escuro (10YR 3/3), franco arenosa (textura média), estrutura forte, pequena, granular, solta, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, transição difusa.

BA: 10-40 cm, bruno amarelado (10YR 5/4), franco arenosa (textura média), estrutura forte, pequena, granular, solta, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, transição difusa.

Bw1: 40-80 cm, bruno amarelado (10YR 5/4), franco argiloarenosa (textura média), estrutura forte, pequena, granular, solta, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, transição difusa.

Bw2: 80-110 cm, amarelo-avermelhado (7,5 YR6/8), franco argiloarenosa (textura média), estrutura forte, pequena, granular, solta, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, transição difusa.

Classificação: LATOSSOLO VERMELHO- AMARELO Distrófico típico

Tabela 05 - Análise química e física do perfil PR.B1

Hor.	Prof. cm	Granulometria (g kg ⁻¹)			Dens. g cm ⁻³	Silte Argila	C g dm ⁻³	N g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	C/N	M.O. g kg ⁻¹	
		Areia	Silte	Argila								
A	0-10	763	88	150	1,36	0,59	17,4	1,3	3,1	13,9	30,0	
BA	10-40	713	100	188	1,48	0,53	7,6	0,8	4	10,1	13,2	
Bw1	40-80	663	100	238	1,45	0,42	6,4	0,6	1,4	10,3	11,0	
Bw2	80-110	638	88	275	1,49	0,32	5,0	0,5	0,6	9,7	8,6	
C1	110-150	663	88	250	-	0,35	-	-	0,8	-	-	
C2	150 - 190+	825	113	63	-	1,79	-	-	0,9	-	-	
Hor.	pH		Complexo sortivo (cmol _c dm ⁻³)							Valor T	Valor V(%)	Valor m(%)
	CaCl ₂	SMP	Ca	Mg	K	Na	Valor S	Al	H+Al			
A	3,76	5,27	1,97	0,51	0,05	0,01	2,55	1,37	8,40	10,95	23,26	34,98
BA	4,08	5,90	2,32	0,40	0,05	0,00	2,77	0,72	5,40	8,17	33,93	20,61
Bw1	4,11	5,98	2,41	0,43	0,03	0,00	2,88	0,90	5,00	7,88	36,52	23,83
Bw2	3,98	6,01	2,08	0,45	0,03	0,00	2,57	1,05	5,00	7,57	33,91	29,04
C1	3,96	6,19	0,39	0,21	0,02	0,00	0,63	0,94	4,30	4,93	12,72	60,01
C2	3,98	6,81	0,39	0,21	0,03	0,00	0,63	0,50	2,70	3,33	18,99	44,13

Horizonte	%					Valor Ki	Valor Kr
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO		
Bw1	9,5	14,35	1,35	0,41	0,01	1,13	1,12

Figura 08 - Perfil de solo PR.B2 - Arapoti/PR



Descrição morfológica do Perfil PR.B2

A: 0-8 cm, bruno avermelhado escuro (5YR 3/4), franco-argiloarenosa (textura média), estrutura forte, pequena, granular, solta, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, transição difusa.

BA: 8-20 cm, bruno avermelhado escuro (2,5 3/4), franco argiloarenosa (textura média), estrutura forte, pequena, granular, solta, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, transição difusa.

Bw1: 20-90 cm, vermelho escuro (2,5 3/6), argiloarenosa (textura argilosa), estrutura forte, pequena, granular, solta, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, transição difusa

Bw2: 90-180 cm⁺, vermelho escuro (2,5 3/6), argiloarenosa (textura argilosa), estrutura forte, pequena, granular, solta, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, transição difusa.

Classificação: LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico

Tabela 06 - Análise química e física do perfil PR.B2

Hor.	Prof. cm	Granulometria (g kg ⁻¹)			Dens. g cm ³	Silte Argila	C g dm ³	N g dm ³	P mg dm ³	C/N	M.O. g kg ⁻¹	
		Areia	Silte	Argila								
A	0-8	663	38	300	1,10	0,13	38,6	4,0	7,4	14,5	101,0	
BA	8-20	663	75	263	1,39	0,29	25,7	2,0	1,9	13,1	44,3	
Bw1	20-90	538	50	413	1,25	0,12	9,3	0,7	1,2	14,0	16,1	
Bw2	90-180	575	38	388	1,28	0,10	5,2	0,5	1,1	10,2	9,0	
Hor.	pH		Complexo sortivo (cmol _c dm ⁻³)							Valor T	Valor V(%)	Valor m(%)
	CaCl ₂	SMP	Ca	Mg	K	Na	Valor S	Al	H+Al			
A	3,60	4,45	1,65	0,35	0,08	0,01	2,10	3,08	15,20	17,30	12,12	59,50
BA	3,74	5,20	1,45	0,30	0,04	0,01	1,80	1,86	9,00	10,80	16,69	50,78
Bw1	3,73	5,37	1,40	0,26	0,02	0,00	1,68	1,67	7,80	9,48	17,71	49,88
Bw2	3,96	5,78	1,47	0,43	0,02	0,01	1,93	0,55	5,80	7,73	24,95	22,19

Horizonte	%					Valor Ki	Valor Kr
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO		
Bw1	8	13,52	6,35	1,1	0,01	1,01	0,81

Figura 09 - Perfil de solo PR.B3 - Curiúva/ PR Descrição morfológica do Perfil PR.B3



A: 0-4 cm, vermelho escuro (10 R3/6), muito argilosa, estrutura forte, pequena, granular, solta, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, transição difusa.

Bw1: 4-65cm, vermelho escuro (10 R3/6), muito argilosa, estrutura forte, pequena, granular, solta, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, transição difusa.

Bw2: 65-200cm⁺, vermelho escuro (10 R3/6) muito argilosa, estrutura forte, pequena, granular, solta, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

Classificação: LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico

Tabela 07 - Análise química e física do perfil PR.B3

Hor.	Prof. cm	Granulometria (g kg ⁻¹)			Dens. g cm ⁻³	Silte Argila	C g dm ⁻³	N g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	C/N	M.O. g kg ⁻¹	
		Areia	Silte	Argila								
A	0-4	238	150	613	1,02	0,24	48,6	3,5	4	13,9	83,7	
Bw1	4-65	88	150	763	1,02	0,20	17,6	1,2	1,2	14,6	30,4	
Bw2	65-200	213	125	663	1,00	0,19	8,7	0,7	0,8	13,0	15,1	
Hor.	pH		Complexo sortivo (cmol _c dm ⁻³)							Valor T	Valor V(%)	Valor m(%)
	CaCl ₂	SMP	Ca	Mg	K	Na	Valor S	Al	H+Al			
A	3,85	4,63	1,00	0,43	0,10	0,01	1,54	1,93	14,10	15,64	9,85	55,61
Bw1	3,99	5,13	0,55	0,21	0,04	0,01	0,81	1,37	9,70	10,51	7,71	62,84
Bw2	4,10	5,73	0,31	0,14	0,02	0,01	0,48	0,63	6,81	6,68	7,19	56,73

Horizonte	%					Valor Ki	Valor Kr
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO		
Bw1	21,1	17,26	16,27	7,25	0,06	2,08	1,36

Figura 10 - Perfil de solo SC.A1 - Rio Negrinho/SC



Descrição Morfológica do Perfil SC.A1

A1: 0-10 cm, bruno-avermelhado-escuro (5YR 2,5/2), argiloarenosa (textura média), fraca, grande, blocos subangulares, plástica e ligeiramente pegajosa, transição plana e clara.

A2: 10-60 cm, bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/2), argiloarenosa (textura média), fraca, grande, blocos subangulares, plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara

A3: 60-100 cm, bruno-avermelhado (5YR 4/4), argiloarenosa (textura média), fraca e grande, blocos subangulares, plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.

Bi: 100-120 cm: (5YR 4/6) Vermelho-amarelado, argiloarenosa (textura média), fraca e grande, blocos subangulares, plástica e ligeiramente pegajosa, transição plana e clara.

C: 120 cm+,) vermelho-amarelado (5YR 5/8, argiloarenosa. (textura média), fraca e grande, blocos subangulares, plástica e ligeiramente pegajosa, transição plana e clara.

Classificação: CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico

Tabela 08 - Análise química e física do perfil SC.A1

Hor.	Prof. cm	Granulometria (g kg ⁻¹)			Dens. g cm ⁻³	Silte Argila	C g dm ⁻³	N g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	C/N	M.O. g kg ⁻¹	
		Areia	Silte	Argila								
A1	0-10	488	113	400	1,15	3,8	32,5	2,1	3,8	15,6	56,1	
A2	10-60	513	113	375	1,16	2,5	18,9	1,3	2,5	15,1	32,6	
A3	60-100	450	100	450	1,35	0,9	14,8	1,0	0,9	15,5	25,6	
Bi	100-120	488	88	425	1,48	0,3	8,8	0,7	0,3	11,9	15,1	
BC	>120	525	113	363	-	0,6	3,8	0,4	0,6	9,6	6,5	
Hor.	pH		Complexo sortivo (cmol _c dm ⁻³)							Valor T	Valor V(%)	Valor m(%)
	CaCl ₂	SMP	Ca	Mg	K	Na	Valor S	Al	H+Al			
A1	3,55	4,55	0,73	0,27	0,04	0,00	1,05	6,40	15,00	16,05	6,51	85,97
A2	3,60	4,86	0,75	0,27	0,03	0,00	1,05	4,91	11,80	12,85	8,15	82,42
A3	3,71	5,04	0,65	0,19	0,02	0,00	0,87	3,73	10,50	11,37	7,61	81,18
Bi	3,85	5,46	0,75	0,29	0,03	0,00	1,06	2,67	7,50	8,56	12,42	71,51
BC	3,91	5,56	0,72	0,27	0,02	0,00	1,02	2,40	6,90	7,92	12,82	70,28

Figura 11 - Perfil de solo SC.A2-Itaipolis/SC



Descrição Morfológica do Perfil SC.A2

Ap: 0-15 cm; bruno avermelhado escuro (5 YR 3/3, úmida), franco argiloarenosa (textura média), fraca, pequena, blocos subangulares, plástica e ligeiramente pegajosa, transição plana e clara.

A: 15-65 cm, cinzento muito escuro (5 YR 3/1, úmida); franco argiloarenosa (textura média), fraca, grande, blocos subangulares, plástica e ligeiramente pegajosa, transição plana e clara.

Bi: 65-105 cm, bruno avermelhado escuro (5 YR 3/2, úmida), franco argiloarenosa (textura média), fraca, grande, blocos subangulares, plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.

BC: 105 cm+, bruno forte (7.5 YR 4/6 úmida), franco argiloarenosa (textura média), fraca, grande, blocos subangulares, plástica e ligeiramente pegajosa, transição plana e clara.

Classificação: CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico

Tabela 09 - Análise química e física do perfil SC.A2

Hor.	Prof. cm	Granulometria (g kg ⁻¹)			Dens. g cm ⁻³	Silte Argila	C g dm ⁻³	N g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	C/N	M.O. g kg ⁻¹	
		Areia	Silte	Argila								
Ap	0-15	688	50	263	0,83	0,19	26,2	1,3	2,7	19,4	45,2	
A	15-65	688	38	275	0,84	0,14	23,2	1,3	1,9	18,3	40,0	
Bi	65-105	675	50	275	0,81	0,18	14,6	0,8	1,9	18,9	25,2	
BC	105+	625	88	288	0,81	0,31	9,6	0,6	1,9	16,5	16,5	
Hor.	pH		Complexo sortivo (cmol _c dm ⁻³)							Valor T	Valor V(%)	Valor m(%)
	CaCl ₂	SMP	Ca	Mg	K	Na	Valor S	Al	H+Al			
Ap	3,67	4,68	0,72	0,26	0,03	0,01	1,02	3,16	13,10	14,12	7,24	75,56
A	3,75	4,85	0,65	0,21	0,02	0,01	0,89	2,98	12,10	12,99	6,83	77,06
Bi	3,78	4,84	0,67	0,22	0,02	0,01	0,92	2,43	12,10	13,02	7,05	72,58
BC	3,87	5,25	0,61	0,18	0,02	0,00	0,81	1,53	8,40	9,21	8,78	65,43

Figura 12 - Perfil de solo SC.B1- Lébon Régis/SC Descrição Morfológica do Perfil SC.B1



A: 0-42 cm; preto (5 YR 2,5/1), textura argilosa, estrutura fraca, pequena média, blocos subangulares, consistência solta, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, transição gradual.

Bi: 42-50 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/4), textura muito argilosa, estrutura fraca pequena a média, blocos subangulares, consistência solta, plástica e pegajosa.

Cr: 50-65+: horizonte constituído por fragmentos de rocha com diâmetro maior que 2 mm.

Classificação: NEOSSOLO LITÓLICO Húmico típico

Tabela 10 -Análise química e física do perfil SC.B1

Hor.	Prof. cm	Granulometria (g kg ⁻¹)			Dens. g cm ⁻³	Silte Argila	C g dm ⁻³	N g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	C/N	M.O. g kg ⁻¹		
		Areia	Silte	Argila									
A	0-42	150	413	438	1,08	0,9	53,5	3,4	1,9	15,9	92,3		
Bi	42-50	250	125	625	1,26	0,2	30,2	1,8	0,6	16,6	52,0		
Hor.	pH	Complexo sortivo (cmol _c dm ⁻³)									Valor T	Valor V(%)	Valor m(%)
		CaCl ₂	SMP	Ca	Mg	K	Na	Valor S	Al	H+Al			
A	3,76	4,40	0,18	0,16	0,09	0,02	0,45	5,32	16,30	16,75	2,68	92,22	
Bi	3,93	4,50	0,15	0,10	0,07	0,02	0,34	5,16	15,20	15,54	2,21	93,76	

Figura 13 - Perfil de solo SC.B2 - Lébon Régis/SC



Descrição Morfológica do Perfil SC.B2

A: 0-20 cm, bruno-avermelhado (2,5 YR 4/3); textura argilosa, estrutura moderada, média e grande, blocos subangulares, plástica, pegajosa, transição difusa.

Bt: 20-170 cm, vermelho (2,5 YR 4/6); textura muito argilosa; estrutura forte, média e grande, blocos subangulares, cerosidade comum, plástica, pegajosa, transição difusa.

BC: 170–200 cm; vermelho (2,5 YR 4/6); textura muito argilosa; estrutura forte, média e grande, blocos subangulares, cerosidade comum, plástica, pegajosa.

Classificação: NITOSSOLO VERMELHO Distroférico típico

Tabela 11 - Análise química e física do perfil SC.B2

Hor.	Prof. cm	Granulometria (g kg ⁻¹)			Dens. g cm ³	Silte Argila	C g dm ³	N g dm ³	P mg dm ⁻³	C/N	M.O. g kg ⁻¹	
		Areia	Silte	Argila								
A	0-20	200	200	600	1,34	0,3	19,8	2,0	2,8	9,8	34,2	
Bt	20-170	225	100	675	1,45	0,1	10,8	1,1	0,9	9,6	18,6	
BC	170-200	213	113	675	1,48	0,2	4,3	0,8	0,9	5,2	7,4	
Hor.	pH		Complexo sortivo (cmol _d /dm ³)							Valor T	Valor V(%)	Valor m(%)
	CaCl ₂	SMP	Ca	Mg	K	Na	Valor S	Al	H+Al			
A	4,13	5,03	1,49	0,66	0,11	0,02	2,28	2,12	10,50	12,78	17,82	48,22
Bt	4,09	4,82	0,83	0,40	0,04	0,02	1,29	3,73	12,10	13,39	9,64	74,30
BC	4,11	4,46	0,46	0,34	0,05	0,03	0,88	4,47	15,20	16,08	5,47	83,57

Horizonte	%					Valor Ki	Valor Kr
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO		
Bt	25,6	19,43	16,88	6,7	0,1	2,24	1,52

Figura 14 – Perfil de solo SC.B3- Rio das Antas/SC.



Descrição Morfológica do Perfil SC.B3

A1: 0-40 cm, bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/3); textura muito argilosa, estrutura subangular, média, moderada; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição difusa.

A2: 40-80 cm; bruno-avermelhado (5YR 4/4); textura muito argilosa, estrutura subangular, média, moderada; plástica e ligeiramente pegajosa, transição difusa.

Bw1: 80-150 cm; vermelho-amarelado (5YR 4/6); textura muito argilosa, estrutura subangular, média, moderada; plástica e ligeiramente pegajosa, transição difusa.

Bw2: 150-170 cm⁺; vermelho-amarelado (5YR 4/6); textura muito argilosa, estrutura subangular, média, moderada; plástica e ligeiramente pegajosa.

Classificação: LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico húmico

Tabela 12 - Análise química e física do perfil SC.B3

Hor.	Prof. cm	Granulometria (g kg ⁻¹)			Dens. g cm ⁻³	Silte Argila	C g dm ⁻³	N g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	C/N	M.O. g kg ⁻¹	
		Areia	Silte	Argila								
A1	0-40	125	163	713	1,21	0,2	27,3	1,9	1,9	14,3	47,1	
A2	40-80	100	150	750	1,40	0,2	20,8	1,4	0,6	15,1	35,8	
Bw1	80-150	138	100	763	1,46	0,1	10,1	1,1	1,2	9,0	17,5	
Bw2	150-170 ⁺	150	75	775	1,46	0,1	4,9	0,8	2,5	6,5	8,5	
Hor.	pH		Complexo sortivo (cmol _c dm ⁻³)							Valor T	Valor V(%)	Valor m(%)
	CaCl ₂	SMP	Ca	Mg	K	Na	Valor S	Al	H+Al			
A1	3,88	4,47	0,33	0,18	0,08	0,04	0,63	3,71	15,20	15,83	3,95	85,58
A2	3,99	4,67	0,36	0,20	0,06	0,03	0,65	3,31	13,10	13,75	4,71	83,64
Bw1	4,15	5,35	0,21	0,16	0,04	0,02	0,44	1,78	8,40	8,84	4,95	80,27
Bw2	4,29	5,58	0,21	0,10	0,10	0,02	0,44	1,15	6,70	7,14	6,12	72,49

Horizonte	%					Valor Ki	Valor Kr
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO		
Bw1	23,6	21,16	16,72	10,73	0,07	1,9	1,33

Figura 15 - Perfil de solo SC.C1 - Ponte Alta do Norte/ SC



Descrição Morfológica do Perfil SC.C1

A: 0-45 cm; bruno avermelhado escuro (5YR 4/4); textura muito argilosa; estrutura moderada, blocos subangulares, média, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição difusa.

Bt1: 45-120 cm; bruno avermelhado (5YR 4/4); textura muito argilosa; estrutura moderada, blocos subangulares, média, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, cerosidade moderada; transição difusa.

Bt2: 120-180 cm; bruno avermelhado (5YR 4/4); textura muito argilosa; estrutura moderada, blocos subangulares, média, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, cerosidade moderada; transição difusa.

BC: 180-198 cm+; bruno avermelhado (5YR 4/4); textura muito argilosa; estrutura moderada, blocos subangulares, média, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

Classificação: NITOSSOLO HÁPLICO Distrófico típico

Tabela 13 - Análise química e física do perfil SC.C1

Hor.	Prof. cm	Granulometria (g kg ⁻¹)			Dens. g cm ⁻³	Silte Argila	C g dm ⁻³	N g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	C/N	M.O. g kg ⁻¹	
		Areia	Silte	Argila								
A	0-45	88	213	700	1,35	0,3	27,1	1,8	2,2	15,2	46,8	
B1	45-120	75	188	738	1,32	0,3	17,6	1,1	1,1	15,7	30,3	
B2	120-180	125	138	738	1,49	0,2	8,9	0,8	0,8	11,7	15,3	
BC	180-185+	88	150	763	1,42	0,2	8,2	0,8	0,8	10,4	14,1	
Hor.	pH		Complexo sortivo (cmol _c dm ⁻³)							Valor T	Valor V(%)	Valor m(%)
	CaCl ₂	SMP	Ca	Mg	K	Na	Valor S	Al	H+Al			
A	3,85	4,49	0,28	0,20	0,08	0,03	0,59	3,75	15,20	15,79	3,75	90,52
B1	3,90	4,60	0,20	0,20	0,05	0,03	0,48	3,51	14,10	14,58	3,40	92,81
B2	4,03	4,60	0,16	0,20	0,09	0,02	0,47	2,74	14,10	14,57	3,22	90,84
BC	4,05	4,93	0,20	0,20	0,05	0,03	0,48	3,05	11,30	11,78	4,01	91,81

Horizonte	%					Valor Ki	Valor Kr
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO		
B1	20	17,09	15,94	9,23	0,08	1,99	1,31
B2	21,3	15,93	16,23	7,65	0,08	2,27	1,45

Figura 16 - Perfil de solo SC.C2 - Otacilio Costa/PR



Descrição Morfológica do Perfil SC.C2

A: 0-30 cm, bruno avermelhado escuro (5YR 3/2), textura argilosa, estrutura moderada, subangular, média, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

Classificação: NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico

Tabela 14 - Análise química e física do perfil SC.C2

Hor.	Prof. cm	Granulometria (g kg ⁻¹)			Dens. g cm ⁻³	Silte Argila	C g dm ⁻³	N g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	C/N	M.O. g kg ⁻¹	
		Areia	Silte	Argila							Valor V(%)	Valor m(%)
A	30	150	313	538	1,21	0,6	29,0	2,2	11	13,1	49,9	
Hor.	pH		Complexo sortivo (cmol _c dm ⁻³)							Valor T	Valor V(%)	Valor m(%)
	CaCl ₂	SMP	Ca	Mg	K	Na	Valor S	Al	H+Al			
A	3,72	3,88	0,14	0,20	0,03	0,02	0,39	9,90	23,70	24,09	1,62	96,18

Figura 17 – Perfil de solo SC.C3 - Palmeira/SC



Descrição Morfológica do Perfil SC.C3

A1: 0-15 cm; bruno avermelhado escuro (5YR 3/2), textura argilosa, estrutura moderada, blocos subangulares, media a grande, ligeiramente plástica e pegajosa, transição gradual.

A2: 15-60 cm; bruno avermelhado escuro (5YR 3/2), textura muito argilosa, estrutura moderada, blocos subangulares, media a grande, ligeiramente plástica e pegajosa transição gradual.

AB: 60-75 cm; bruno-avermelhado (5YR 5/4), textura muito argilosa, estrutura moderada, blocos subangulares, media a grande, ligeiramente plástica e pegajosa, transição gradual.

B: 75-100 cm; Vermelho amarelado (5YR 5/8), textura muito argilosa, estrutura moderada, blocos subangulares, media a grande, plástica e pegajosa, transição difusa.

C: 100-140+ cm, amarelo-avermelhado (5YR 6/6); textura muito argilosa, estrutura moderada, media a grande, blocos subangulares, plástica e pegajosa.

Classificação: CAMBISSOLO HÚMICO Alumínico típico

Tabela 15 - Análise química e física do perfil SC.C3

Hor.	Prof. cm	Granulometria (g kg ⁻¹)			Dens. g cm ⁻³	Silte Argila	C g dm ⁻³	N g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	C/N	M.O. g kg ⁻¹	
		Areia	Silte	Argila								
A1	0-15	163	288	550	1,16	0,5	33,7	2,7	4,5	12,3	58,0	
A2	15-60	125	263	613	1,31	0,4	27,4	2,1	0,9	13,2	47,2	
AB	60-75	100	250	650	1,38	0,4	15,9	1,5	0,8	10,9	27,4	
B	75-100	100	263	638	1,45	0,4	11,1	1,2	0,6	9,2	19,1	
C1	100-140+	133	238	650	1,45	0,4	4,9	0,8	0,9	6,3	8,4	
Hor.	pH		Complexo sortivo (cmol _c dm ⁻³)							Valor T	Valor V(%)	Valor m(%)
	CaCl ₂	SMP	Ca	Mg	K	Na	Valor S	Al	H+Al			
A1	3,73	4,11	0,61	0,60	0,27	0,04	1,53	8,51	20,40	21,93	6,95	84,81
A2	3,79	4,03	0,26	0,20	0,17	0,03	0,66	8,90	22,00	22,66	2,93	93,05
AB	3,83	4,05	0,20	0,01	0,14	0,04	0,38	9,63	20,40	20,78	1,81	96,25
B	3,83	4,00	0,21	0,01	0,13	0,03	0,37	9,14	22,00	22,37	1,64	96,15
C1	3,82	4,00	0,13	0,20	0,14	0,04	0,51	9,91	22,00	22,51	2,25	95,13

Horizonte	%					Valor Ki	Valor Kr
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO		
B	24,5	15,42	5,48	1,09	0,01	2,7	2,32

2.4 Dados de produtividade

Os dados de produtividade das parcelas controle (parcelas que não sofreram tratamentos de fertilização e desbaste) podem ser visualizados na Tabela 17. Estas parcelas são constituídas por uma área de 700m² aproximadamente, possuindo 8 linhas com 12 árvores cada, totalizando 96 árvores em espaçamento de 2m x 3m, sendo a bordadura da parcela constituída por 2 ou mais linhas. As variáveis de produtividade Índice de Sítio (IS) com base aos 15 anos, o Volume e Incremento Médio Anual (IMA) com idade aproximada de 13 anos foram obtidos do banco de dados do IPEF, tendo como base os inventários anuais realizados nas parcelas de estudo pelas empresas florestais que integram o PPPIB.

Tabela 16 – Localização, classificação do solo, Índice de Sítio (IS), Volume e Incremento Médio Anual (IMA) das parcelas de estudo

Município	Parcela	Classificação do solo	IS (m)	Volume (m ³)	IMA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)
Telêmaco Borba/PR	PR.A1	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	25,3	540,20	42,40
	PR.A2	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	24,7	371,05	28,68
	PR.A3	CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico latossólico	23,8	498,11	38,00
Arapoti/PR	PR.B1	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico	24,4	485,00	36,90
	PR.B2	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	19,0	382,40	27,20
Curiúva/PR	PR.B3	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	25,0	590,00	44,00
Rio Negrinho/SC	SC.A1	CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico	23,8	583,40	43,80
Itaiópolis/SC	SC.A2	CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico	22,4	455,63	34,35
Lébon Régis/SC	SC.B1	NEOSSOLO LITÓLICO Húmico típico	20,0	485,00	37,60
	SC.B2	NITOSSOLO VERMELHO Distroférico típico	20,3	540,30	39,30
Rio das Antas/SC	SC.B3	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico húmico	22,5	589,90	43,20
Ponte Alta do Norte/SC	SC.C1	NITOSSOLO HÁPLICO Distrófico típico	25,0	610,30	44,50
Otácilio Costa/SC	SC.C2	NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico	20,7	468,80	33,70
Palmeira/SC	SC.C3	CAMBISSOLO HÚMICO Alumínico típico	22,1	469,80	36,00

3 REFERÊNCIAS

ABRÃO, S.F.; DA ROSA, S.F.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SECCO, D.; EBLING, A.A. Alterações químicas de um CAMBISSOLO HÚMICO causadas por florestamento com *Pinus taeda* em área de campo natural. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 45, n. 3, p. 455 2015.

ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L.; DOUGHERTY, P.; KRESS, L.; KING, J. Leaf area and above and belowground growth responses of loblolly pine to nutrient and water additions. **Forest Science**, Bethesda, v. 44, n 2, p317-328, 1998.

ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L.; FOX, T.R. Nutrient use and uptake in *Pinus taeda*. **Tree physiology**, v. 28, n. 7, p. 1083-1098, 2008.

ALBAUGH, T.J.; FOX, T.R.; RUBILAR, R.A.; COOK, R.L.; AMATEIS, BURKHART, H.E. Post thinning density and fertilization affect *Pinus taeda* stand and individual tree growth. **Forest Ecology Management**.396:207–216. 2017.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**. Hamburg, v 113, n. 3/4, p. 407-427,2013.

ALVES, M.J.F. **Reserva mineral de potássio em LATOSSOLO cultivado com *Pinus taeda* L.** 29 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

ALVES, M.J.F.; MELO, V.F.; REISSMANN, C.B.; KASEKER, J.F. Reserva mineral de potássio em Latossolo cultivado com *Pinus taeda* L. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 37:1599-1610, 2013.

AMARAL, F.H.C.; FURTINI NETO, A.E.; CURI, N.; INDA, A.V.; ARAÚJO, E.F. Produtividade de *Eucalyptus grandis* e sua relação com a cinética de liberação

de macronutrientes. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 979-991, 2015.

BARROS FILHO, N.F.; SCHUMACHER, M.V.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F.; VALADARES, S.V. Tree Growth and Nutrient Dynamics in Pine Plantations in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 41, e0160400. 04, 2017.

BELLOTE, A.F.J.; SILVA, H.D.; FERREIRA, C.A.; ANDRADE, G.C. Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais. **Boletim de Pesquisa Florestal/Embrapa Florestas**, Colombo, 37; 99-106, 1998.

BELLOTE, A.F.J.; TOMAZELLO FILHO, M.; DEDECEK, R.A. Influência dos nutrientes minerais e do solo sobre a produtividade, estrutura anatômica e a densidade da madeira de *Pinus taeda*. **Documentos/ Embrapa Florestas**, Colombo, 94p. 2005.

BOGNOLA I.A.; DEDECEK R.A.; LAVORANTI O.J.; HIGA A.R. Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de *Pinus taeda*. **Pesquisa Florestal Brasileira/ Embrapa Florestas**, Colombo, 30; 37- 49, 2010.

CALVARUSO, C; TURPAULT, MP.; LECLERC, E.; RANGER,J.; GARBAYE, J.; UROZ, S.; FREY-KLETT,P. Influence of Forest Trees on the Distribution of Mineral Weathering-Associated Bacterial Communities of the *Scleroderma citrinum* Mycorrhizosphere . **Applied and Environmental Microbiology**; 76(14): 4780–4787. 2010.

CASTRO, P.P.; CURI, N.; FURTINI NETO, A.E.; RESENDE, A. V.; GUILHERME, L.R.G.; MENEZES, M.D.; ARAÚJO, E.F.; FREITAS, D.A.F.; MELLO, C.R.; SILVA, S.H.G. Química e mineralogia de solos cultivados com Eucalipto (*Eucalyptus sp.*). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 88, p. 645-657, 2010.

CHUN, L.; HUI-YI, H. Tree-ring element analysis of Korean pine (*Pinus koraiensis* Sieb.et Zucc.) and Mongolian oak (*Quercus mongolica* Fisch. ex Turcz.) from Changbai Mountain, north-east China. **Trees**, 6:103-108. 1992.

CORREA, R. S.; BELLOTE, A. F. J. Soil attributes and biomass yield from *Pinus caribaea* var. *Hondurensis*. **CERNE**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 181-187, 2011.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil/ Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral/Ministério de Minas e Energia. Mapa Geológico de Santa Catarina. (escala 1:500.000). 2014.

CUTTER, B.E.; GUYETTE, R. P. Anatomical, Chemical, and Ecological Factors Affecting Tree Species Choice in Dendrochemistry Studies. **Journal of Environmental Quality**, vol 22, num 3, pp 611-619, 1993.

DONHA, C. G. **Dinâmica de crescimento e estoque de biomassa, carbono e nutrientes em espécies arbóreas da floresta atlântica no sul do Brasil**. 225 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. -Brasília, DF. 356 p. 2018.

FICK, S.E.; R.J. HIJMANS. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology** 37 (12): 4302-4315. 2017.

GATIBONI, L.C., DA SILVA, W.C., MUMBACH, G.L.; SCHMITT, D.E.; IOCHIMS, D.A.; STAHL, J.; VARGAS, C.O. Use of exchangeable and nonexchangeable forms of calcium, magnesium, and potassium in soils without fertilization after successive cultivations with *Pinus taeda* in southern Brazil. **J Journal of Soils and Sediments**, 20:665–674. 2020.

GATIBONI, L.C.; VARGAS, C.O.; ALBUQUERQUE, J.A.; ALMEIDA, J.A.; STAHL, J.; CHAVES, D.M.; BRUNETTO, G.; DALL'ORSOLETTA, D.J.; RAUBER, L.P. Phosphorus fractions in soil after successive crops of *Pinus taeda* L. without fertilization. **Ciência Rural** 47:1–8. 2017.

GIACHINI, A.J.; SOUZA, L.A.B.; OLIVEIRA, V.L. Species richness and seasonal abundance of ectomycorrhizal fungi in plantations of *Eucalyptus dunnii* and *Pinus taeda* in southern Brazil. **Mycorrhiza** 14:375–381. 2004.

GEE, G.W.; OR, D. Particle size analysis. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. **Methods of soil analysis**. Physical methods. Madison, Soil Science Society of America, Part 4. p. 255-293, 2002.

GOMES, F. S.; MENEGOL, O. F.; DEMATTÊ, J.A.M. Soil attributes related to Eucalypt and Pine plantations productivity in the South of Brazil. **Journal of Sustainable Forestry**, New Haven, v. 24, n.4, p. 61-82, 2007.

HASHIMOTO, M. O. **Avaliação de diferentes técnicas de extração de nutrientes do solo e de plantas de *Pinus taeda* L.** 64 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

HRISTOVSKI, S.; MELOVSKI, L. Radial patterns of 13 elements in the tree rings of beech trees from Mavrovo National Park, Fyrom **Arch. Biol. Sci.**, Belgrade, 62 (2), 351-361, 2010.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Anuário 2019**. 80 p.

IBAÑEZ, C.; NUNEZ, P.; PEZZUTTI, R.; RODRIGUEZ, F. Soil ripping and phosphorus fertilization effects on *Pinus taeda* initial growth in red soils of Northeast Corrientes Province, Argentina. **Bosque** (Valdivia), vol.25, n.2, pp.69-76, 2004.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual técnico de pedologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: 2015.

KASEKER, J. F. **Composição química de acículas, serapilheira, solos rizosférico e não rizosférico e variabilidade espacial em ensaio de omissão de nutrientes em *Pinus taeda***. 95 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

LASO GARICOITIS, L. S. **Estado nutricional e fatores do solo limitantes do crescimento de *Pinus taeda* L.** em Telêmaco Borba. 128 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1990.

LÚCIO, A. D. C.; ROSSATO, R. A.; SCHUMACHER, M. V.; FORTES, F. O.; STORCK, L.; WITSCHORECK, R. Limites de precaução e de controle em análises nutricionais de espécies florestais. **Revista Árvore**, 34(3), 529-537. 2010.

MAEDA, S; BOGNOLA, I. A. Chemical properties of soil treated with waste from the pulp and paper industries. **Brazilian Journal of Forest Research**. 33, 74, 169, Apr. 2013.

MARQUES, R.; MOTTA, A.C.V. Análise química do solo para fins de fertilidade. In: LIMA, R.M. (Org.). **Manual de diagnóstico da fertilidade e manejo dos solos agrícolas**. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, p.81-102. 2003.

MELO, V.F.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M.; NOVAIS, R.F.; FONTES, M.P.F. Formas de potássio e de magnésio em solos do Rio Grande do Sul, e sua relação com o conteúdo na planta e com a produção em plantios de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**.19:165-71. 1995.

MENEGOL, O. **Índice de sítio e relação entre altura e teores nutricionais das acículas em povoamentos de *Pinus elliottii* var. *elliottii* no segundo planalto**

paranaense. 74 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1991.

MINEROPAR – Serviço Geológico do Paraná. Mapa Geológico do Estado do Paraná: unidades estratigráficas. (Escala: 1:650.000). 2006.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. UFLA 2 ed. Lavras, 729 p., 2006.

MORO, L.; GATIBONI, L.C.; SIMONETE, M.A.; CASSOL, P.C.; CHAVES, D.M. Resposta de *Pinus taeda* com diferentes idades à adubação NPK no Planalto Sul Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, 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**. 117 f. Dissertação de Mestrado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/ Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

MUNHOZ, J.S.B. **Influência dos fatores edafoclimáticos na produtividade e na eficiência do uso dos recursos naturais do *Pinus taeda* L. sob distintos manejos no Sul do Brasil**. 142 f. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/ Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

PAIM, R.M. **Efeito do uso de lama de cal e cloreto de potássio no solo, estado nutricional e crescimento do *Pinus taeda* L., sobre LATOSSOLO**. 124 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

PENNINCKX, V.; GLINEUR, S.; GRUBER, W.; HERBAUTS, J; MEERTS, P. Radial variations in wood mineral element concentrations: a comparison of beech and pedunculate oak from the Belgian Ardennes. **Annals of Forest Science** 53(3): 253-260. 2001.

REISSMANN, C.B.; WISNIEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de *Pinus*. In: GONÇALVEZ, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, p. 135-165. 2000.

REISSMANN, C. B.; ZOTTL, H. W. Problemas nutricionais em povoamentos de *Pinus taeda* em áreas de arenito da formação Rio Bonito – Grupo Guatá. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, Curitiba, v. 9, p. 75-80, 1987.

RIGATTO, P.A.; DEDECEK, R.A.; MATTOS, J.L.M. Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *Pinus taeda*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n.5, p. 701-709, 2005.

RIGUEIRO-RODRIGUEZ, A.; CASTRO, S.; M.R. MOSQUERA-LOSADA. Effects of dose and period of sewage sludge application on soil, tree and pasture components in a *Pinus radiata* D. Don silvopastoral system. **Agroforest Syst**, 79:237-247, 2010.

RODRIGUES, C.; BELLOTE, A.F.J; DEDECEK, R.A.; GOMES, F.S. Alteração na Nutrição e na produtividade de *Pinus taeda* L. provocadas pela aplicação de resíduo celulósico. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 51, p.131-143. 2005.

SANCHEZ, F. G. Loblolly pine needle decomposition and nutrient dynamics as affected by irrigation, fertilization, and substrate quality. **Forest Ecology and Management** 152, 85-96. 2001.

TOMAZELLO FILHO, M.; KRÜGNER, T.L. Aspectos da associação micorrízica em *Pinus* spp. **Série Técnica do Instituto de Estudos Florestais**, Departamento de Silvicultura da ESALQ-USP, 3:1-32, 1982.

VALERI, S. V. **Exportação de biomassa e nutrientes de povoamentos de *Pinus taeda* L. desbastados em diferentes idades**. 164 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1988.

VETTORAZZO, S. C. **Intensidade e local de amostragem para avaliação nutricional de povoamentos de *Pinus taeda* L.** 114 f. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/ Universidade de São Paulo, 1994.

VOGEL, H.L.M.; SCHUMACHER, M.V.; NEVES, J.C.L. Avaliação nutricional e índices DRIS em um povoamento de *Pinus taeda* L. submetido à adubação NPK **Ecologia e Nutrição Florestal**, Santa Maria-RS, v.6, n.3, p.59-70, 2018.

WILL, R.; FOX, T.; AKERS, M.; DOMEK, J.C.; GONZALEZ-BENECKE, C.; JOKELA, E.; KANE, M.; LAVINER, M.; LOKUTA, G.; MARKEWITZ, D.; et al. A range-wide experiment to investigate nutrient and soil moisture interactions in loblolly pine plantations. **Forests**, 6, 2014–2028, 2015.

WINAGRASKI, E. **Dinâmica de ectomicorrizas em um plantio adulto de *Pinus taeda* submetido a adubação e calagem no município de Jaguariaíva, PR.** 70 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

4 CHAPTER I: Relationship between edaphoclimatic attributes and productivity of loblolly pine in southern Brazil

4.1 ABSTRACT

The productivity of loblolly pine in southern Brazil is one of the highest in the world, in part because of genetic breeding programs but also as consequence of the species adaptation to the edaphoclimatic conditions and of the right silvicultural management. Soil attributes seem to be responsible by the productivity variation once the climatic parameters show small variation between the different places where the plantations are established. Thus, the understanding of the relationship between wood productivity and soil attributes is very important and can serve as a basis for guiding management practices in forest plantations. This research aimed to identify which are the natural factors related to the productivity of *Pinus taeda* planted on different geological formations in southern Brazil. The selection of the study plots was carried out based on site productivity, altitude, soil maps and geological maps. In the selected plots, soil profiles were opened to classify and characterize the physical and chemical attributes of the soils. The soil attributes evaluated were depth of the A and B soil horizons, pH, clay content, carbon, phosphorus, basic cations and potential acidity. Mean annual precipitation and mean temperature of coldest and warmest quarter of the year were collected for all the study sites. Productivity was represented by the mean annual increment (MAI) and by the site index (SI). To identify the relationship between soil attributes and productivity, redundancy analysis (RDAs) and correlation analysis were performed. The plots showed MAI varying from 27.2 to 45.6 m³ ha⁻¹ year⁻¹, and SI varying from 9.0 and 26.6 m. Among the climatic parameters the temperature of the warmest quarter of the year (Tmax) show positive correlation with site index (SI), and among the soil attributes the best correlation was between mean annual increment (MAI) and clay content. Another important result was the correlation between clay and carbon content in the hole soil profile which combination seem to present a high influence on the loblolly productivity in Southern Brazil.

Keywords: *Pinus taeda*, soil fertility, forest soils

4.2 INTRODUCTION

Loblolly pine productivity has increased considerably in recent decades due to management practices and genetic improvement (Zhao et al., 2016). Currently, this species is considered the most important for commercial purposes on a world-wide context (Will et al., 2015).

In United States, genetically improved loblolly pine with basic site preparation will produce 9–12 m³ ha⁻¹ year⁻¹ over a 25 year rotation (Carter; Foster, 2006), but plantations in high quality sites with adequate silvicultural management will reach a maximum production rate of 30 to 35 m³ ha⁻¹ year⁻¹ (Sampson; Allen, 1999; Borders et al., 2004; Fox et al. 2007), and may reach a maximum site index of 32 m (Zhao et al., 2016).

In Brazil, loblolly pine is the second most planted timber species, with average productivity of 30,1 m³ ha⁻¹ yr⁻¹ (IBÁ, 2019), but reaching values higher than 45 m³ ha⁻¹ year⁻¹ in some sites (Kronka et al. 2005).

Because its ease adaptation to different site conditions including low fertility soils (Reissmann and Wisniewski, 2000), the areas occupied with loblolly pine in southern Brazil are generally those least favorable to agricultural cultivation. In the state of Paraná, the areas planted with *Pinus* are located mainly on soils developed from sedimentary rocks from the Paleozoic era (Reissmann and Wisniewski, 2000; Gomes et al., 2007; Paim, 2007), presenting great granulometric variation (MINEROPAR, 2006). In the State of Santa Catarina, *Pinus* plantations are mainly found on soils developed from sedimentary rocks from the Paleozoic era (CPRM, 2014), in the Northern and in the Serrano plateau. Moreover, rocks from the Mesozoic era can be found in the Serrano plateau, which was marked by basaltic effusions from the Serra Geral Formation (Reis et al. 2014).

Recent studies have shown that edaphic attributes are related to *Pinus taeda* productivity in these regions (Rigatto et al., 2005; Gomes et al., 2007, Bognola et al., 2010; Correa and Bellote, 2005; 2011; Munhoz, 2011; 2015). The edaphic attributes are the result of soil formation factors (parent material, climate, organisms, weather and relief) and pedogenetic processes (Jenny, 1941; Simonson, 1959; Foth, 1990; Bockheim et al., 2000; 2014), and in most cases

these attributes are determinant in the productive capacity of the site. In a region with the same climatic condition, the growth and nutritional composition of the vegetation are mainly influenced by the characteristics of the soil's parent material (Jenny, 1941).

Nevertheless, very few are the studies addressed to understand the relationship between edaphic attributes and productivity for this species in southern Brazil. And the existing studies present a certain limitation regarding the generalization of their results as they do not cover the full range of geological and soil situations of the loblolly pine plantations in the region. In this context, a research more comprehensive regarding the variety of pedological situations and seeking to identify the relationships between forest productivity and soil attributes could be useful to guide management practices for loblolly pine plantations.

Hypothesing that edaphic attributes contribute more to the productivity than climatic parameters does, we aimed to identify which are the natural factors related with the productivity of *Pinus taeda* in southern Brazil.

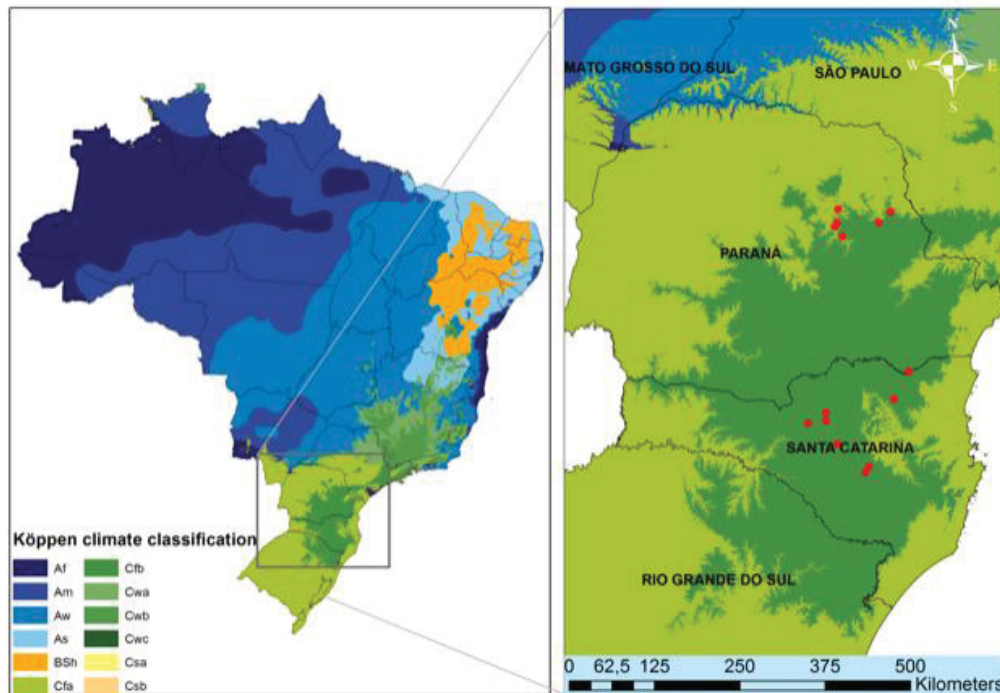
4.3 MATERIAL AND METHODS

4.3.1 Forest plots characteristics

The *Pinus taeda* plantations, aged 13 years-old in average, were located in the states of Paraná and Santa Catarina, belonging to the forestry companies that are part of the Cooperative Program of Research on *Pinus* in Brazil (PPPIB), conducted by the Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF).

The predominant climate in the region is Cfb (Köppen) (Figure 18), humid subtropical with mild summer, evenly distributed rains and without a dry season, with the average temperature of the warmest month below 22 °C and the average temperature of the coldest month below 18 °C, with occurrence of frosts (Alvares et al., 2013).

Figure 18 - Localization and climate classification of the study plots in southern Brazil (red dots represent the fourteen study plots).



The selection and characterization of the fourteen study plots were based on site productivity, altitude, soil maps and geological maps. The forest stands had almost the same age and were planted with spacing between trees of 2 x 3 m. No fertilization or thinning were performed on the study plots. The experimental design carried out by all the companies were the same, but the genetic material wasn't always the same (Table 17). Local climate data (Table 17) were obtained from a high spatial resolution global weather and climate database (Fick and Hijmans, 2017) accessing the website <http://www.worldclim.org>.

Dendrometric data were obtained from the inventories conducted annually in the fourteen plots, in areas of 700 m². The density of trees per hectare was calculated for each plot; the site index (IS - m) was obtained from the average of the last two measurements, with the aid of the equation proposed by Munhoz (2015); the wood volume stock (m³ ha⁻¹), was obtained using volumetric equations provided by the companies; and the mean annual increment (MAI – m³ ha⁻¹ year⁻¹) was calculated by the ratio between wood volume and stand age.

Table 17 – Climatic and genetic characteristics of the study plots

Local	Plot	Mean temperature of coldest quarter (°C)	Mean temperature of warmest quarter (°C)	Annual precipitation (mm)	Genetic origin
Paraná State (PR)	PR.A1	14.35	21.37	1364	PCS RIGESA – USA
	PR.A2	14.31	21.18	1387	PCS KLABIN/PR-USA
	PR.A3	14.39	21.43	1382	PCS KLABIN/PR-USA
	PR.B1	14.72	21.63	1314	APS BARRA MANSA
	PR.B2	14.92	21.69	1277	APS BARRA MANSA
	PR.B3	15.02	21.97	1381	PCS BARRA MANSA
Santa Catarina State (SC)	SC.A1	12.59	20.10	1458	APS SANTA VERA
	SC.A2	12.59	20.10	1458	PCS MOBASA LAGES
	SC.B1	10.60	18.24	1633	PCS 2a. Geração-Georgia/USA
	SC.B2	10.96	18.71	1573	PCS 2a. Geração-Georgia/USA
	SC.B3	11.55	19.54	1610	PCS 2a. Geração-Georgia/USA
	SC.C1	11.32	19.26	1624	APS KLABIN/SC-USA
	SC.C2	11.72	19.67	1572	APS KLABIN/SC-USA
	SC.C3	11.75	19.19	1662	PCS KLABIN/SC-USA

4.3.2 Soil classification and soil chemical and physical characteristics

At each site, close to the study plot, a soil profile was opened up to the bottom of the B horizon for its morphological characterization and soil sampling for physical and chemical analyses. Between 2018 and 2019, disturbed and undisturbed (with volumetric metal rings) samples were collected in each of the horizons identified in the soil profiles. The Soil Classification was according the Brazilian Soil Classification System (EMBRAPA, 2018). The following chemical attributes of the soil were determined: P and K (Mehlich I), exchangeable Al, Ca and Mg (KCl 1 mol / L), pH CaCl₂, potential acidity (H + Al), according to Marques and Motta (2003). C was determined by total combustion in an elemental analyzer, ELEMENTAR - Vario EL III. The granulometric analysis of the soil was performed using the Bouyoucos densimeter method (Gee and Or, 2002) and the soil density (ρ_s) was obtained according to EMBRAPA (2011), through the ratio between dry mass of the soil (m_s) and the soil volume of undisturbed samples (V_t), using the expression ($\rho_s = m_s/V_t$). The estimate of the carbon stock in each profile was performed using the following formula: total C (Mg ha⁻¹) = [C content (g kg⁻¹) x soil density (kg dm⁻³) x soil layer thickness (cm)]/10.

4.3.3 Statistical analyses

To assess the influence and relationship between climatic and soil characteristics with the productivity of *P. taeda*, redundancy analysis (RDA) and correlation analysis were performed using the statistical software Past 4.01 (Hammer et al., 2001) and R 3.6.1 (R Core Team, 2014).

4.4 RESULTS

4.4.1 Soil attributes

The soils in the study plots showed a great variation in their classification which was related to the great variety of their geological material, being formed from sandstones, siltstones, shales, claystones, and micaceous, feldspar and diabase materials. The differences of geological materials and of pedogenetic processes resulted in different soil classes (Table 18). The diversity of the parent material and pedogenesis also influenced the chemical and physical attributes of the soil (Table 19). Concerning the chemical attributes of the soil, pH ranged from 3.6 to 4.2; sum of bases (SB) varied between 0.39 to 2.55 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ (A horizon) and 0.27 to 2.50 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ (B horizon); P content ranged between 0.9 to 11.0 mg dm^{-3} (A horizon) and 0.3 to 1.9 mg dm^{-3} (B horizon); and C content varied between 9.0 to 38.6 g kg^{-1} (A horizon) and 4.7 to 30.2 g kg^{-1} (B horizon). Regarding the physical attributes, the depth reached by A horizon ranged from 4 to 100 cm, and for the B Horizon from 4 to 200 cm; and clay content ranged from 150 to 713 g kg^{-1} (A horizon) and from 207 to 766 g kg^{-1} (B horizon).

Table 18 - Geological formations, plots identification, soil classification, coordinates, altitude, age and density of forest stands

Geological formation*	Plot (soil class)	Coordinates	Altitude (m)	Age of stands	Trees/ha
Guatá Group - Rio Bonito Formation. Paleozoic/sandstones, siltstones	SC.A2 (KFD)**	-26.5628 -49.7290	972	13.3	1225
	SC.A1 (KFD)	- 26.1938 - 49.5178	983	13.3	1447
Itararé Indiviso Group. Paleozoic/shales, claystones, sandstones, siltstones.	PR.A3 (EEE)	-24.2735 -50.6042	783	13.1	1503
	PR.A2 (EEE)	-24.2217 -50.5730	840	12.9	1534
	PR.B2 (EEE)	-24.0785 -49.8008	830	14.1	1088
Paraná Group - Ponta Grossa Formation. Paleozoic-Devonian/dark grey shales and siltstones, micaceous stones	PR.B1 (EEE)	-24.2192 - 49.9661	756	13.2	980
Parana Group - Furnas Formation. Paleozoic - Devonian/white sandstones, medium to coarse grained, micaceous stones, feldspar, kaolinitic matrix	SC.C3 (KFD)	-27.5388 -50.1452	883	13.1	1081
Rastro River formation. Paleozoic/claystones, silty claystones, siltstones.	SC.C2 (LEF)	-27.4634 -50.0857	880	13.9	1647
	PR.A1 (EEE)	-24.4073 -50.4961	779	12.8	1521
Palermo formation/Areas with influence of dikes of diabase	PR.B3 (EEE)	-24.0448 -50.5611	720	13.4	1003
	SC.B3 (EEE)	-26.8875 -50.9875	979	13.6	1423
Serra Geral. Mesozoic/basalt, dacite	SC.B1 (LEF)	-26.7468 -50.7289	1279	12.9	1515
	SC.B2 (HCC)	-26.8546 -50.7262	1126	13.8	1794
	SC.C1 (HCC)	-27.1635 -50.5551	969	13.7	1274

* Source: MINEROPAR, (2006); CPRM, (2014). **Soil classification equivalency according to Soil Survey Staff (2014): *EEE: Hapludox (Haplic / Udic / Oxisol)*; *KFD: Humudepts (Humic /Udic / Inceptisols)*; *LEF: Udorthents (Udic / Orthic / Entisol)*; *HCC: Kandiodults (Kandic / Udic / Ultisol)*

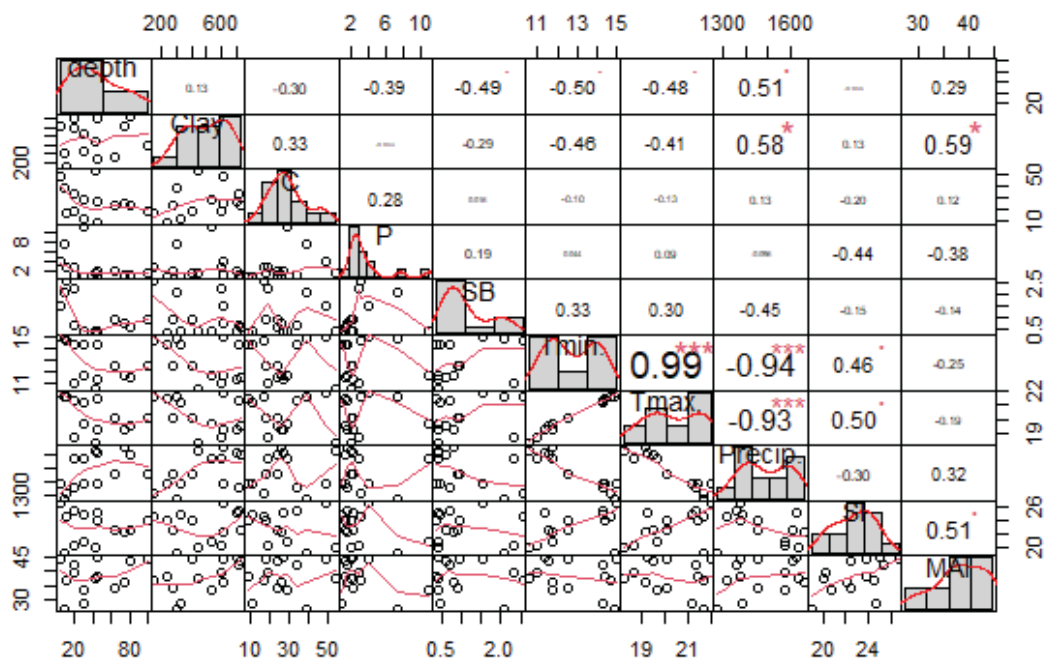
Table 19 - Morphological and chemical attributes of the surface and subsurface soil horizons and productivity of plots

Plot	Soil horizon	Depth cm	pH	Clay -----g kg ⁻¹ -----	C	P mg dm ³	SB ----cmol _c dm ³ ----	H+Al	Cstock Mg ha ⁻¹	SI m	MAI m ³ ha ⁻¹ year ⁻¹
PR.B2	A	0-8	3.6	300	38.60	7.40	2.10	15.20	206.9	19.0	27.2
	B	8-180	3.9	389	8.30	1.20	1.82	6.84			
PR.A2	A	0-30	3.9	325	11.70	0.90	0.47	10.50	159.8	24.7	28.7
	B	30-190	4.2	372	5.39	0.90	0.37	5.78			
SC.C2	A	0-30	3.7	538	29.00	11.00	0.39	23.70	105.1	20.7	33.7
SC.A2	A	0-65	3.7	272	23.89	2.08	0.90	12.33	292.0	22.4	34.3
	B	65-105	3.8	275	14.60	1.90	0.92	12.10			
SC.C3	A	0-75	3.8	608	26.36	1.60	0.78	21.00	293.1	22.1	36.0
	B	75-100	3.8	638	11.10	0.60	0.37	22.00			
PR.B1	A	0-10	3.8	150	17.40	3.10	2.55	8.40	116.8	24.4	36.9
	B	10-110	3.7	207	5.84	1.88	2.50	5.00			
SC.B1	A	0-42	3.8	438	53.50	1.90	0.45	16.30	274.2	20.0	37.6
	B	42-50	3.9	625	30.20	0.60	0.34	15.20			
PR.A3	A	0-45	4.1	238	9.40	1.20	0.36	7.20	93.5	23.8	38.0
	B	45-90	4.0	300	4.70	0.50	0.34	5.40			
SC.B2	A	0-20	4.1	600	19.80	2.80	2.28	10.50	287.7	20.3	39.2
	B	20-170	4.1	675	10.80	0.90	1.29	12.10			
PR.A1	A	0-20	3.8	713	33.60	1.50	0.69	16.30	260.0	25.3	42.4
	B	20-190	4.2	742	11.00	1.30	0.45	6.65			
SC.B3	A	0-80	3.9	732	24.05	1.25	0.63	14.15	366.0	22.5	43.2
	B	80-170	4.2	766	8.94	1.49	0.44	8.02			
SC.A1	A	0-100	3.6	408	18.62	1.99	0.97	11.60	253.5	23.8	43.8
	B	100-120	3.9	425	8.80	0.30	1.06	7.50			
PR.B3	A	0-4	3.9	613	48.60	4.00	1.54	14.10	250.9	26.6	44.0
	B	4-200	4.0	694	11.47	0.92	0.58	7.71			
SC.C1	A	0-45	3.9	700	27.10	2.20	0.39	15.20	418.0	25.0	44.5
	B	45-180	4.0	738	13.73	0.97	0.27	14.10			

4.4.2 Relationship between soil attributes and forest productivity

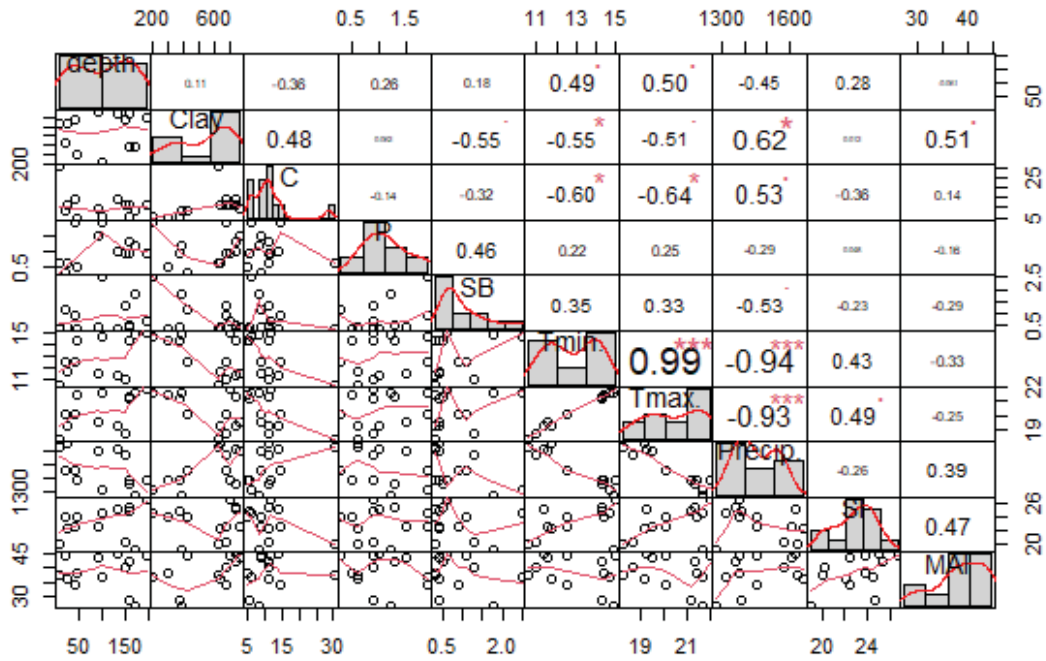
For the A horizon as well as for the B horizon the Pearson's correlation indicates that clay is the only soil attribute showing significant correlation with mean annual increment (MAI). Among the climatic parameters it was observed a less significant correlation between Mean temperature of warmest quarter (Tmax) and site index (SI) (Figures 19 and 20).

Figure 19 - Correlations between soil attributes of A horizon, climatic variables and *Pinus taeda* productivity (* $p < 0.05$).



The main diagonal presents the histograms with the data's distribution for each variable. The lower diagonal represents dispersion graphs of the relationship between the variables and the upper diagonal represents the correlation and significance of the relationships between the variables

Figure 20 - Correlations between soil attributes of B horizon, climatic variables and *Pinus taeda* productivity (* $p < 0.05$).



The main diagonal presents the histograms with the data's distribution for each variable. The lower diagonal represents dispersion graphs of the relationship between the variables and the upper diagonal represents the correlation and significance of the relationships between the variables

The RDA for the A horizon (Figure 21) showed that climatic variables and soil attributes explained 67% of axis 1 and 8% of axis 2 ($R^2 = 0.74$). The clay content of horizon A explained the MAI variations. In the case of the B horizon (Figures 22), the environmental variables explained 64% of axis 1 and 7% of axis 2 ($R^2 = 0.71$). The RDA ordination for both horizons was similar (RDA scores can be seen in the Appendices 1 e 2).

Figure 21: Redundancy analysis (RDA) for the soil A horizon, climatic variables and productivity (Tmin: Mean temperature of coldest quarter; Tmax: Mean temperature of warmest quarter; Precip.: Annual precipitation)

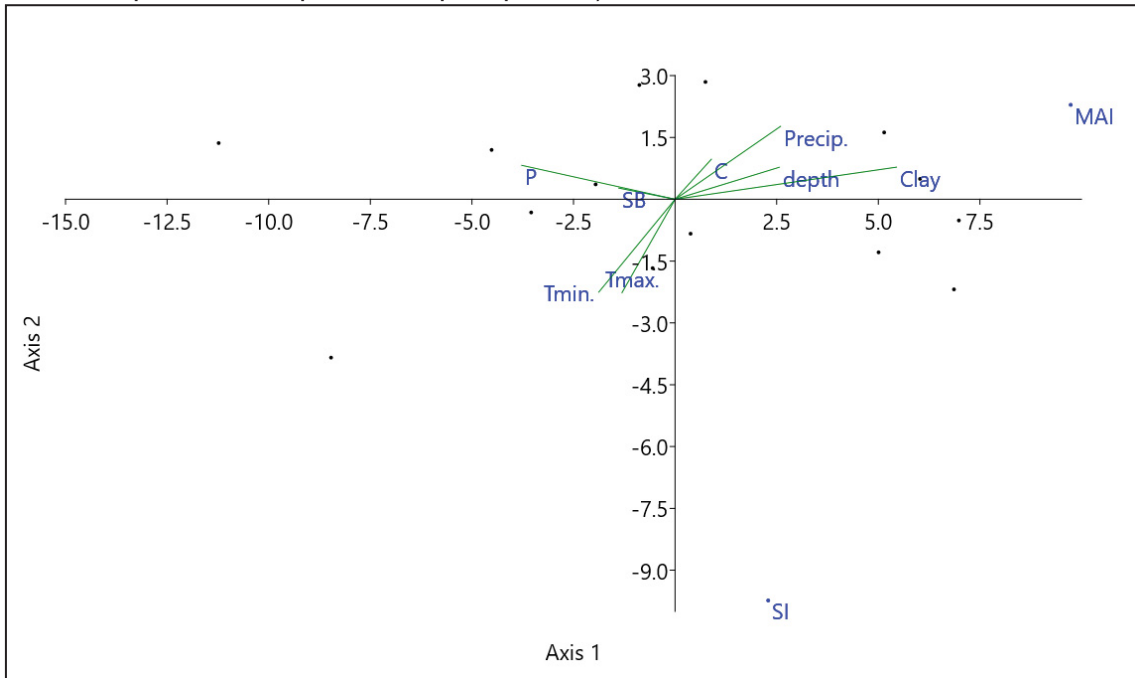
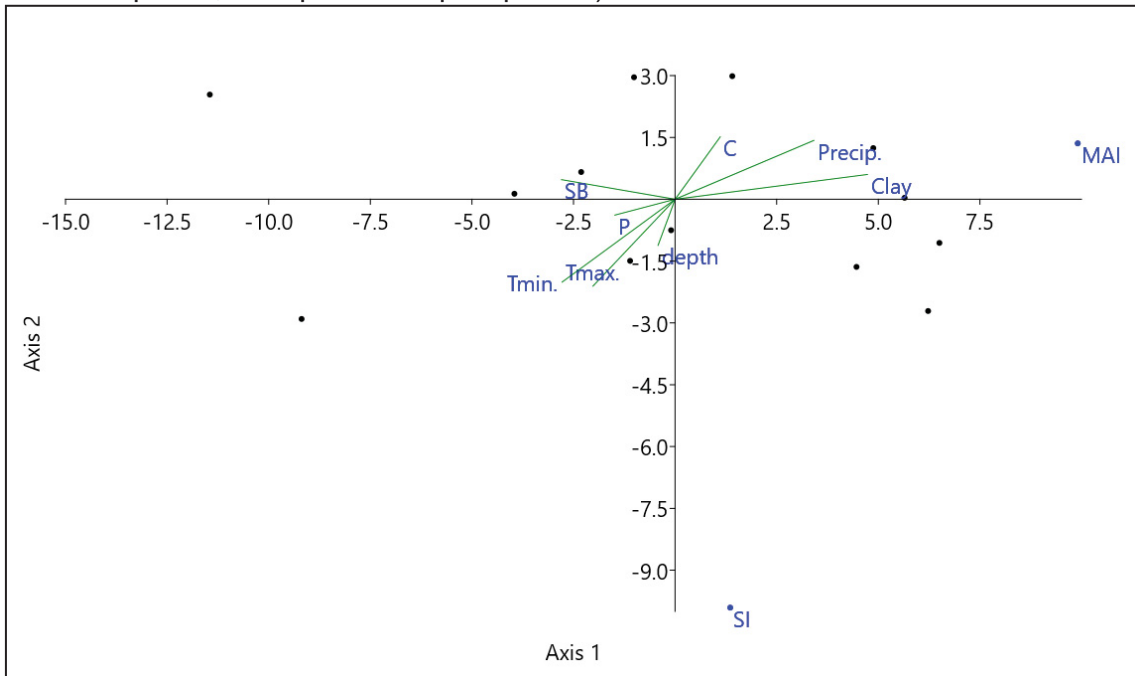


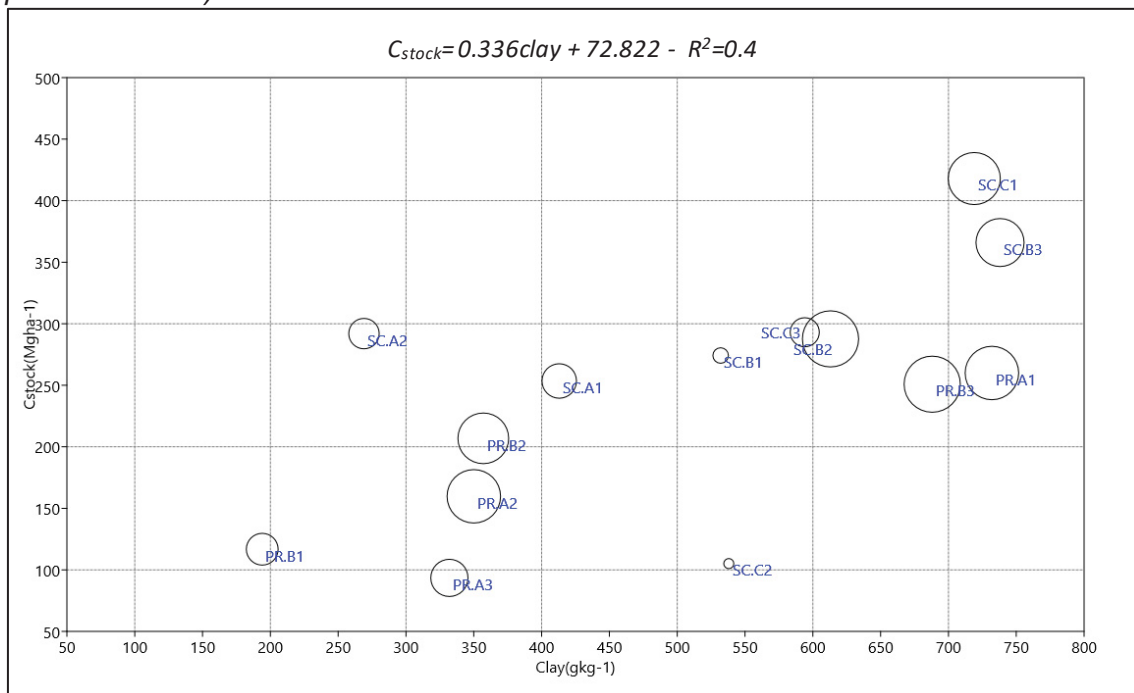
Figure 22: Redundancy analysis (RDA) for the soil B horizon, climatic variables and productivity (Tmin: Mean temperature of coldest quarter; Tmax: Mean temperature of warmest quarter; Precip.: Annual precipitation)



4.4.3 Relationships between carbon stock, clay, soil depth and productivity

The carbon stock of the soil, calculated for sum of the A and B horizons, presented values between 79.4 and 418.0 Mg ha⁻¹, and a narrow relationship with the clay content in the soil, which can be expressed by the equation $C_{stock} = 0.336clay + 72.822$ ($R^2=0.4$) (Figure 23). The majority of the more productive sites (SC.C1, SC.B3, PR.B3 and PR.A1) showed high values of clay content (varying from 688 to 738 g kg⁻¹), carbon stock (varying from 260 to 418 Mg ha⁻¹) and a high depth of the soil (170 to 200 cm). One of the highest productive sites (SC.A1) showed clay content and carbon stock much lower (413 g kg⁻¹ and 253 Mg ha⁻¹ respectively), but presented a very deep A horizon (100 cm – Table 19).

Figure 23: Relationship between clay content and carbon stock in the sites with variable soil depth and productivity (*The size of the circles represents the depth of the soils – A plus B horizons*)



4.5 DISCUSSION

4.5.1 Soil attributes

The variety of the parent material reflected directly on the chemical and physical attributes of the soil in the plots. Where the parent materials were diabase and basalt (PR.A1, PR.B3, SC.B3), the soil weathering resulted in clayey soils because of the low quartz content in these materials, corroborating the close relationship between the parent material and the soil texture as a result of weathering process (Kämpf and Curi, 2012). The intensity of the pedogenetic processes in the soil profiles varied considerably, a fact verified by the variability of the depth reached by the A and B horizons and by the variability of the mineral attributes of the soils.

The effective depth of rooting by *Pinus taeda* was not analyzed in detail in this research. However, during the morphological descriptions of the soil profiles we saw an abundance of lateral roots in shallow soils but the presence of thick to very thick roots over the entire length of the soil profile in the case of deep Oxisols. In *Pinus taeda* plantations, the presence of numerous thin and very thin roots can be seen in the superficial horizons, and even in the litter accumulated on the soil, where nutrient cycling process are taking place (Lopes et al., 2010). The roots in the deeper layers of the soil are mainly related to the rooting role of supporting trees and may even determine their dominance or elimination by competing species (Gonçalves and Melo, 2005), but in some cases the roots of *Pinus taeda* can reach a depth of more than two meters in soils free of impediment layers, and the subsurface horizons of the soil can play a fundamental role for the supply of nutrients and water during water stress events (Schultz, 1997) thus explaining in part the highest productivity of *Pinus taeda* in the deepest soils.

The sum of basic cations was low in all soil profiles, reflecting the acidity of these soils where the clay minerals are kaolinitic and oxidic in nature, and the cation exchange capacity (CEC) was mainly related to the hydrogen and aluminum ions (H + Al). These chemical characteristics, mainly associated to soil pedogenesis, are also related to the absence of soil management practices such as liming and fertilization, in addition to a long history of forest exploitation in these areas. Areas planted with *Pinus* for long periods show reduction of P, K, Ca and Mg in the soil (Paim, 2007; Abrão et al., 2015; Gatiboni et al., 2017; 2020). Despite of this depletion of nutrients in the soil related to plant uptake and

biomass and nutrients exportation (Londero et al., 2011; Moro et al., 2014) it is clear the role of the litter decomposition to increase the soil nutrients stock. Most of the basic cations and phosphorus were present in the A horizon where the carbon content was also more elevated. The carbon in the soil is the main component of the soil organic matter (SOM) and the SOM works as a source of nutrients but also as a reservoir because of its elevated cation exchange capacity (Baldock and Broos, 2012).

4.5.2 Relationship between edaphoclimatic attributes and forest productivity

For the regions under study, among the climatic parameters we observed a positive relationship between the temperature of the warmest quarter of the year (Tmax) and site index (SI) but no correlations with mean annual increment despite SI and MAI were correlated to each other. On the other hand, soil attributes did. Clay content in both A and B horizons was correlated to *Pinus taeda* productivity (MAI) as it has already been mentioned in other works (Rigatto et al., 2005; Gomes et al., 2007; Dedecek et al., 2008; Bognola et al., 2010). By favoring soil aggregation and generating micropores, clay contributes to water retention and water availability in the soil, and this factor positively affects the productivity of *Pinus taeda* (Santos Filho et al., 1992; Albaugh et al., 1998; King et al. 1999; Reissman and Wisniewski, 2000; Albaugh et al., 2004; Munhoz, 2011; 2015; Will et al., 2017), as water acts directly on important physiological processes such as stoma opening and closing and nutrient absorption, which affect photosynthetic capacity of plants (Stape et al., 2010). And the low water availability is identified as one of the main factors that affects the leaf area of *Pinus taeda*, compromising the interception of solar radiation (Allen and Albaugh 1999). Another important point in relation to water availability in the soil is its influence in increasing microbial activity and consequently increasing the speed of the litter decomposition process in plantations with *Pinus* (McElligott, 2017), which very important for the cycling of nutrients in these forests (Schumacher et al. 2008; Vieira and Schumacher, 2010).

Despite de importance of clay for the cation exchange capacity of the soils there was no positive correlation between the basic cations (SB) and *Pinus taeda*

productivity. The same occurred between phosphorus in the soil and productivity. The absence of relationship between chemical soil attributes and productivity has already been reported by Santos Filho et al. (1992) and Rigatto et al. (2005). These attributes frequently used to characterize soil fertility in agricultural systems seems not to be useful for some forest ecosystems. Along the forest growth there is a great variety of pathways used by trees to acquire nutrients as for instance foliar uptake from the atmosphere or during precipitation, litter decomposition, and symbiosis with microorganisms (Johnson and Turner, 2019). The uptake of nutrients by symbiosis with mycorrhiza in *Pinus taeda* plantations is an important pathway which allow this species to grow even on low fertility soils (Giachini et al., 2004). By this way, the trees can uptake nutrients which are not exchangeable or soluble in the soil (Calvaruso et al., 2010).

Among the fourteen soil profiles analyzed in this study, five presented humic A horizon. The finding of these horizons can be easily verified in the field by the dark coloring resulted from the enrichment of organic matter in the soil (Rossi and Rabenhorst, 2016). High levels of carbon in the soil as well as the formation of humic horizons are often related to factors such low temperature which is common at higher altitudes, and contribute to the accumulation of organic material in the soil (Jenny 1941; Dick et al., 2008; 2009; Kämpf and Curi, 2012; Bockheim et al., 2014). Another factor which is associated with the carbon accumulation is the clay content. Soils with a clayey texture showed the highest carbon stocks, since the humidified organic matter and clay have great organomineral interaction (Kaiser and Guggenberg, 2007; Dick et al., 2009; Braida et al. 2011). The organic matter of the soil is indicated as an attribute that favors the growth of *Pinus taeda* (Munhoz, 2015), and in the case of shallow soils, the thickness of the A horizon has a fundamental role for the forest productivity. In addition, the carbon content, as mentioned before, can contribute to increase the CEC in *Pinus taeda* plantations (Kaseker, 2012). Organic matter as well as clay favors the maintenance of soil moisture and contributes to the retention of cations, due to the presence of negative charges in its structure, thus being an important attribute for maintaining the productivity of *Pinus taeda* in the Southern Brazil.

4.6 CONCLUSIONS

- ✓ The productivity of loblolly pine in southern Brazil is influenced by the edaphoclimatic attributes.
- ✓ Site index (SI) was related to the temperature of the warmest quarter (Tmax) and mean annual increment (MAI) was related to the clay content in the soil.
- ✓ The combination of carbon and clay content in the soil profile seems to present a high influence on the loblolly productivity in southern Brazil.

4.7 REFERENCES

ABRÃO, S. F.; ROSA, S.F.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SECCO, D.; EBLING, A.A. Alterações químicas de um CAMBISSOLO HÚMICO causadas por florestamento com *Pinus taeda* em área de campo natural. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 45, n. 3, p. 455, 2015.

ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L.; DOUGHERTY, P.M.; JOHNSON, K.H. Long term growth responses of loblolly pine to optimal nutrient and water resource availability. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, p.3-19, 2004.

ALBAUGH, T. J.; ALLEN, H. L.; DOUGHERTY, P.M.; KRESS, L.; KING, J. Leaf area and above and belowground growth responses of loblolly pine to nutrient and water additions. *Forest Science*, Bethesda, v 44, n2, p 317-328, 1998.

ALLEN, H. L.; ALBAUGH, T. J. Ecophysiological basis for plantation production: A loblolly pine case study. **Bosque**, Valdivia, v. 20, n. 1, p 3-8, 1999.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**. Hamburg, v 113, n. 3/4, p. 407-427,2013.

BALDOCK, J.A.; BROOS, K. Soil Organic Matter. In: HUANG, P.M., LIN, Y., SUMNER, M.E. (Eds). **Handbook of soil sciences**. Properties and process. Second ed., Taylor & Francis Group, Boca Raton. 11: p. 1- 52, 2012.

BOCKHEIM, J.G.; GENNADIYEV, A.N. The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base. **Geoderma**, v. 95, p.53-72, 2000.

BOCKHEIM, J.G.; GENNADIEYEV, A.N.; HARTEMINK, A.E.; BREVIK, E.C. Soil-formation factors and Soil Taxonomy. **Geoderma**, v. 226-227, p. 231-237, 2014.

BOGNOLA, I.A.; DEDECEK R.A.; LAVORANTI O.J.; HIGA A.R. Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de *Pinus taeda*. Pesquisa Florestal Brasileira, Embrapa Florestas, 30:37- 49, 2010.

BORDERS, B.E.; WILL, R.E.; MARKEWITZ, D.; CLARK, A.; HENDRICK, R.; TESKEY, R.O; ZHANG, Y. Effect of complete competition control and annual fertilization on stem growth and canopy relations for a chronosequence of loblolly pine plantations in the lower coastal plain of Georgia. For. Ecol. Manage., 192, pp. 21-3. 2004.

BRAIDA, J.A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M. **Matéria orgânica e seu efeito na física do solo**. Tópicos Ciência do solo, 7:221-278, 2011.

CALVARUSO, C., TURPAULT, M.P., LECLERC, E., et al. Influence of Forest Trees on the Distribution of Mineral Weathering-Associated Bacterial Communities of the *Scleroderma citrinum* mycorrhizosphere . **Appl Environ Microbiol.**; 76(14): 4780–4787, 2010.

CORREA, R.S.; BELLOTE, A.F.J. Soil attributes and biomass yield from *Pinus caribaea* var. *Hondurensis*. **CERNE**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 181-187, 2011.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil/Secretaria de geologia, mineração e transformação mineral/Ministério de Minas e Energia, Mapa Geológico de Santa Catarina. Escala 1:500.000. 2014.

DEDECEK, R.A.; FIER, I.S.N; SPELTZ, R; LIMA, L. C. de S. *Influência do sítio no desenvolvimento do *Pinus taeda* aos 22 anos: 1. características físico-hídricas e químicas do solo.* **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, p. 507-516. 2008.

DICK, D.P.; NOVOTNY, H.E.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Química da matéria orgânica do solo. In: Melo V.F., Alleoni, L.R.F. (eds). **Química e Mineralogia do Solo**. Parte II, cap XI, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, 685p. 2009.

DICK, D. P.; SILVA, L. B.; INDA, A. V.; KNICKER, H. Estudo comparativo da matéria orgânica de diferentes classes de solos de altitude do sul do Brasil por técnicas convencionais e espectroscópicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.32, n.6, p.2289-2296, 2008.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 225 p. 2011.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. -Brasília, DF. 356 p. 2018.

FICK, S.E.; R.J. HIJMANS. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology** 37 (12): 4302-4315. 2017.

FOTH, H.D. **Fundamentals of soil science**. 8. ed. New York: John Wiley, p. 250-270, 1990.

FOX, T.R.; JOKELA, E.J.; ALLEN, H.L. The development of pine plantation silviculture in the southern United States, *Journal of Forestry* ,105, 337–347. 2007.

GATIBONI, L.C., DA SILVA, W.C., MUMBACH, G.L.; SCHMITT, D.E.; IOCHIMS, D.A.; STAHL, J.; VARGAS, C.O. Use of exchangeable and nonexchangeable forms of calcium, magnesium, and potassium in soils without fertilization after successive cultivations with *Pinus taeda* in southern Brazil. *J Journal of Soils and Sediments*, 20:665–674. 2020.

GATIBONI, L.C.; VARGAS, C.O.; ALBUQUERQUE, J.A.; ALMEIDA, J.A.; STAHL, J.; CHAVES, D.M.; BRUNETTO, G.; DALL'ORSOLETTA, D.J.; RAUBER, L.P. Phosphorus fractions in soil after successive crops of *Pinus taeda* L. without fertilization. *Ciência Rural* 47:1–8. 2017.

GEE, G.W.; OR, D. Particle size analysis. In: DANE, J.H. & TOPP, G.C. **Methods of soil analysis. Physical methods**. Madison, Soil Science Society of America, Part 4. p.255-293, 2002.

GIACHINI, A.J., SOUZA, L.A.B., OLIVEIRA, V.L. Species richness and seasonal abundance of ectomycorrhizal fungi in plantations of *Eucalyptus dunnii* and *Pinus taeda* in southern Brazil. *Mycorrhiza* 14:375–381, 2004.

GOMES, F. S.; MENEGOL, O. F.; DEMATTÊ, J.A.M. Soil attributes related to Eucalypt and Pine plantations productivity in the South of Brazil. *Journal of Sustainable Forestry*, New Haven, v. 24, n.4, p. 61-82, 2007.

GONÇALVES, J. L. M.; MELLO, S. L. M. O sistema radicular das árvores. In: **Nutrição e fertilização de florestas**. Piracicaba: IPEF. p. 221-267, 2005.

HAMMER, Ø; HARPER, D.A.T.; RYAN, P.D. **PAST: Paleontological Statistics** Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4, 1–9. 2001.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. 80 p. Anuário 2019.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual técnico de pedologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015.

JENNY, H. **Factors of soil formation**. New York: Dover Publications. 281p. 1941.

JOHNSON, D. W., TURNER J. Nutrient cycling in forests: a historical look and newer developments. **Forest Ecology and Management**, 444:344-373.2019.

KAISER, K.; GUGGENBERGER, G. Sorptive stabilization of organic matter by microporous goethite: Sorption into small pores vs. surface complexation. **European Journal Soil Science**,58:45-59, 2007.

KÄMPF, N.; CURI N. Formação e evolução do solo (pedogênese). In: Ker, J.C; Curi N.; Schaefer C.E.G.R.; Vidal-Torrado, P. (Eds.). **Pedologia: fundamentos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p 208-291, 2012.

KASEKER, J. F. Composição química de acículas, serapilheira, solos rizosférico e não rizosférico e variabilidade espacial em ensaio de omissão de nutrientes em *Pinus taeda*. 95 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

KING, J. S.; ALBAUGH, T. J.; ALLEN, H. L.; KRESS, L. W. Stand-level allometry in *Pinus taeda* as affected by irrigation and fertilization. **Tree Physiol** 19:769–778, 1999.

KRONKA, F.J.N.; BERTOLANI, F.; HERRERA PONCE, R. **A cultura do Pinus no Brasil**. São Paulo, SBS, 160 p. 2005.

LONDERO, E. K., SCHUMACHER, M. V., SZYMCZAK, D. A. et al. Exportação e reposição nutricional no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L.

em área de segunda rotação. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 487-497, 2011.

LOPES, V.G.; SCHUMACHER, M.V.; CALIL, F.N.; VIERA, M; WITSCHORECK, R. Quantificação de raízes finas em um povoamento de *Pinus taeda* L. e uma área de campo em Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 569-578, 2010.

MARQUES, R.; MOTTA, A.C.V. Análise química do solo para fins de fertilidade. In: LIMA, R.M. (Org.). **Manual de diagnóstico da fertilidade e manejo dos solos agrícola**. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, p.81-102, 2003.

McELLAGOTT, K. M. **Soil Respiration and Decomposition Dynamics of Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.) Plantations in the Virginia Piedmont**. 135p. Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. 2017.

MENEGOL, O. **Índice de sítio e relação entre altura e teores nutricionais das acículas em povoamentos de *Pinus elliottii* var. *elliottii* no segundo planalto paranaense**. 74 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1991.

MINEROPAR. Mapa Geológico do Estado do Paraná: unidades estratigráficas. Escala: 1:650.000. 2006.

MORO, L., GATIBONI, L.C., SIMONETE, M.A. et al. Resposta de *Pinus taeda* com diferentes idades à adubação NPK no Planalto Sul Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, 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**. 117 f. Dissertação de Mestrado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

MUNHOZ, J. S. B. **Influência dos fatores edafoclimáticos na produtividade e na eficiência do uso dos recursos naturais do *Pinus taeda* L. sob distintos manejos no Sul do Brasil.** 142 f. Tese de Doutorado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/ Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

PAIM, R. M. **Efeito do uso de lama de cal e cloreto de potássio no solo, estado nutricional e crescimento do *Pinus taeda* L. sobre LATOSSOLO.** 124p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

R CORE TEAM. A language and environment for statistical computing v3.3. 2014.

REIS, G. S.; MIZUSAKI, A.M.; ROISENBERG, A.; RUBERT, R. R. Formação Serra Geral (Cretáceo da Bacia do Paraná): um análogo para os reservatórios ígneo-básicos da margem continental brasileira. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS **Pesquisas em Geociências**, 41 (2): 155-168, 2014.

REISSMANN, C. B.; WISNIEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de *Pinus*. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal.** Piracicaba: IPEF, p. 135-165. 2000.

RIGATTO, P. A.; DEDECEK, R.A.; MATTOS, J.L.M. Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *Pinus taeda*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n.5, p. 701-709, 2005.

ROSSI, A.M.; RABENHORST, M.C. Pedogenesis and landscape relationships of a Holocene age barrier island. **Geoderma.**; 262:71- 84, 2016.

SAMPSON, D.A.; ALLEN, H.L. Regional influences of soil available water-holding capacity and climate, and leaf area index on simulated loblolly pine productivity. **For. Ecol. Manage.**, 124, pp. 1-12. 1999.

SANTOS FILHO, A.; LASO, L.S.; REISSMANN, C.B. et al. Desenvolvimento do *Pinus taeda* L. em função das características dos solos em Telêmaco Borba/PR. **Agrárias**, 12, 1-2, 13-24. 1992.

SCHULTZ, R. P. **The ecology and culture of Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.)**. New Orleans: Agricultural Handbook 713. U. S. Department of Agriculture, Forest Service Washington, D. C., p. 20-28, 1997.

SCHUMACHER, M. V.; VIERA, M.; WITSCHORECK, R. Produção de serapilheira e transferência de nutrientes em área de segunda rotação com floresta de *Pinus taeda* L. no município de Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 4, p. 471-480, 2008.

SIMONSON, R.W. Outline of a generalized theory of soil genesis. **Soil Science Society Proceedings**. 23, 152-156, 1959.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. 372p. 2014.

STAPE, J.L., BINKLEY, D., RYAN, M.G., FONSECA, S.R.L., TAKAHASHI, E.N., SILVA, C.R., HAKAMADA, S.R., FERREIRA, J.M., LIMA, A.M., GAVA, J.L., LEITE, F.P., SILVA, G., ANDRADE, H., ALVES, J.M. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**. 259: 1674–1684, 2010.

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**, Viçosa, v.34, n.1, p.85-94, 2010.

WILL, R.; FOX, T.; AKERS, M.; DOMEK, J.C.; GONZALEZ-BENECKE, C.; JOKELA, E.; KANE, M.; LAVINER, M.; LOKUTA, G.; MARKEWITZ, D.; et al. A range-wide experiment to investigate nutrient and soil moisture interactions in loblolly pine plantations. **Forests**, 6, 2014–2028, 2015.

ZHAO, D.; KANE, M.; TESKEY, R.; FOX, T. R.; ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L. RUBILAR, R. Maximum response of loblolly pine plantations to silvicultural management in the southern United States. **Forest Ecology and Management** 375: 105–111, 2016.

5 CAPÍTULO II: Relações entre adubação, teores de P, K, Ca e Mg avaliados com diferentes extratores e produtividade do *Pinus taeda*

5.1 RESUMO

Os extratores químicos utilizados com frequência nas análises de rotina de fertilidade do solo são empregados com sucesso para estimativa da disponibilidade de nutrientes em áreas agrícolas, mas nem sempre estimam adequadamente esta disponibilidade em áreas florestais. Pesquisas usando extratores como o ácido cítrico a 1% ou fazendo a determinação de elementos totais ou pseudototais do solo têm mostrado que estas metodologias podem complementar as análises de rotina do solo e ajudar na interpretação das relações entre a fertilidade do solo, a nutrição mineral e a produtividade das espécies florestais. Este trabalho teve por objetivo avaliar as relações existentes entre a fertilização, os teores de P, K, Ca e Mg, obtidos com diferentes métodos analíticos e a produtividade de *Pinus taeda*. As parcelas de estudo situam-se em plantações com *Pinus taeda* que integram o Programa Cooperativo sobre Pesquisa do *Pinus* no Brasil (PPPIB)/Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) nos estados do Paraná e Santa Catarina. Foram coletadas amostras de solo nas parcelas dos tratamentos fertilizado e não fertilizado nas profundidades 0-10 e 10-20 cm, e realizadas as seguintes análises químicas do solo: P e K (Mehlich I e ácido cítrico a 1%), Ca e Mg trocáveis (KCl e ácido cítrico a 1%); análise dos elementos totais no solo (EPA 3052) para P e K, e pseudototais (EPA 3051) para Ca e Mg. A fertilização promoveu um aumento significativo nos teores de Ca na profundidade de 0 a 10 cm tanto nos teores trocáveis como nos teores pseudototais do solo; e no caso do Mg, este efeito foi observado apenas para os teores trocáveis. As metodologias de análise de rotina e extração pelo ácido cítrico a 1% apresentaram correlação positiva para K, Ca e Mg. Não houve aumento significativo na produtividade do *Pinus taeda* após a fertilização. O IMA apresentou correlação positiva fraca com o Ca e Mg extraídos pelo método ácido cítrico a 1% e com Ca extraído pelo método pseudototal.

Palavras chave: *Pinus taeda*, solo, fertilização, ácido cítrico, EPA 3051, EPA 3052

ABSTRACT

Chemical extractors used frequently in routine soil fertility analyzes are successfully employed to estimate nutrient availability in agricultural areas, but they do not always adequately estimate this availability in forest areas. Research using extractors such as 1% citric acid or making the determination of total or pseudototal elements of the soil has shown that these methodologies can complement the routine analyzes of the soil and help in the interpretation of the relationships between soil fertility, mineral nutrition and the productivity of forest species. This work aimed to evaluate the relationship between fertilization, the levels of P, K, Ca and Mg, obtained with different analytical methods and the productivity of *Pinus taeda*. The study plots are located in plantations with *Pinus taeda* that are part of the Cooperative Program on *Pinus* Research in Brazil (PPPIB) / Institute for Forest Research and Studies (IPEF) in the states of Paraná and Santa Catarina. Soil samples were collected from the fertilized and unfertilized treatments at depths 0-10 and 10-20 cm. The following soil analyzes were carried out: P and K (Mehlich I and 1% citric acid), exchangeable Ca and Mg (KCl and 1% citric acid); analysis of total elements in the soil (EPA 3052) for P and K, and pseudototals (EPA 3051) for Ca and Mg. Fertilization promoted a significant increase in Ca contents at a depth of 0 to 10 cm in both exchangeable and pseudototal levels of the soil; and in the case of Mg, this effect was observed only for exchangeable levels. The methodologies of routine analysis and extraction by citric acid at 1% presented a positive correlation for K, Ca and Mg. There was no significant increase in *Pinus taeda* productivity after fertilization, and the IMA showed a weak positive correlation with the Ca and Mg extracted by the 1% citric acid method and with Ca extracted by the pseudototal method.

Keywords: *Pinus taeda*, soil, fertilization, citric acid, EPA 3051, EPA 3052

5.2 INTRODUÇÃO

O *Pinus taeda* é uma espécie adaptada a solos ácidos e de baixa fertilidade e eficiente no uso de nutrientes, mas que responde em crescimento quando sob melhor oferta de nutrientes, sendo a caracterização da relação entre a disponibilidade de nutrientes e a produtividade da espécie muitas vezes limitada pelos métodos analíticos empregados em análises de rotina de fertilidade do solo.

Esta espécie tem mostrado pouca resposta de crescimento ao aumento do pH do solo, sendo também altamente tolerante a teores elevados de Al no solo (REISSMANN; WISNEWSKI, 2000; ROCHA et al., 2019). Devido a estas características, a fertilização em áreas de plantio com *Pinus taeda* não é uma prática comum no sul do Brasil. Entretanto, pesquisas realizadas em diversas regiões apontam que esta espécie pode apresentar resposta positiva em termos de produtividade e nutrição quando recebe adubação mineral (ALBAUGH et al., 1998; SANCHES, 2000; IBÁÑEZ et al., 2004; ALBAUGH et al., 2008; FAUSTINO et al., 2013; MORO et al., 2014; BATISTA et al., 2015; ROCHA et al., 2019). Áreas de plantio com esta espécie que não receberam fertilização podem apresentar, após sucessivos ciclos de exploração, decréscimo de nutrientes no solo como Ca, Mg e K (ABRÃO et al., 2015; GATIBONI et al., 2019) e P (GATIBONI et al., 2017). Ferreira et al. (2001) salientam que a falta de reposição de nutrientes, como Ca, Mg, Zn e B nas plantações com *Pinus*, poderá levar à redução da produtividade dos povoamentos. No sul do Brasil são poucas as pesquisas que avaliam os níveis e estoques de K, Ca e Mg restantes no solo após sucessivas rotações com *Pinus*; e no médio prazo este fato pode tornar-se preocupante no que se refere à manutenção da fertilidade e conseqüentemente produtividade destas áreas (GATIBONI et al., 2019).

Um aspecto importante a ser considerado na caracterização da fertilidade do solo são os métodos analíticos empregados para determinação dos nutrientes. O uso de extratores nas análises de solo está baseado no fato de que estes simulam a extração dos elementos pelas raízes, sendo que as quantidades de elementos extraídas afetam as variações nas quantidades absorvidas pelas plantas, refletindo no crescimento vegetal. Os extratores diferenciam-se entre si quanto à capacidade de extração, em função de aspectos como a composição

química, características da operação e da interação solo-extrator (CQFS-PR, 2019). Extratores utilizados com frequência nos laboratórios de rotina de fertilidade de solo, como é o caso do Mehlich 1 e do KCl, podem ser empregados com sucesso para estimativa da disponibilidade de nutrientes em áreas com cultivos agrícolas, porém nem sempre estimam adequadamente esta disponibilidade para espécies florestais. Metodologias envolvendo o uso do ácido cítrico a 1% como extrator dos nutrientes do solo (REISSMANN; ZOTTL, 1987; HASHIMOTO, 2011; AMARAL et al., 2015) e a análise de elementos da reserva do solo (não trocáveis e estruturais) (MELO et al., 1995; CASTRO et al., 2010; ALVES 2012; ALVES et al., 2013; AMARAL et al., 2015; AMARAL 2016) podem eventualmente representar melhor o que as espécies florestais estariam utilizando para sua nutrição e crescimento.

As espécies florestais possuem um ciclo de vida superior à maioria das espécies agrícolas e podem provocar, pela ação de suas raízes ou em combinação com microrganismos, alterações químicas no solo que favoreçam a extração de outras formas de nutrientes, além daquelas consideradas trocáveis ou de disponibilidade imediata (CALVARUSO et al., 2010; HASHIMOTO, 2011; ALVES, 2012). Além disto, para enfrentar estresses bióticos e abióticos em consequência do longo ciclo de vida que possuem, as espécies florestais também utilizam estratégias para a retirada de nutrientes do solo, como a interação com fungos micorrízicos, os quais são conhecidos pela capacidade de solubilização de minerais do solo (GIANINAZZI-PEARSON, 1996; SOUCHIE et al., 2007; CALVARUSO et al., 2010; SMITH et al., 2011). Na simbiose micorrízica, o fungo coloniza os espaços que não são alcançados pelas raízes, contribuindo para o aumento da taxa de absorção de nutriente (SOUCHIE et al., 2007; CALVARUSO et al., 2010; SMITH et al., 2011). A simbiose entre *Pinus* e os fungos ectomicorrízicos (TOMAZELLO FILHO; KRÜNGNER; 1982; WINAGRASKI, 2014) é fato bastante conhecido, e estes fungos podem maximizar a absorção de água e nutrientes como o N, P e K (SAWYER et al., 2003; SOUZA et al., 2004). Os mecanismos responsáveis pela solubilização de minerais pelos microrganismos geralmente encontram-se associados à excreção de ácidos orgânicos como o cítrico, oxálico, alfa-cetoglutárico, e inorgânicos, que agem como agentes de dissolução (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). A produção de ácidos orgânicos, enzimas extracelulares, e a exploração

do solo pelas hifas são mecanismos pelos quais os fungos ectomicorrízicos aceleram a liberação de nutrientes para a solução do solo (OLSSON et al., 2002).

Os nutrientes podem estar no solo em formas prontamente disponíveis às plantas, como é o caso da solução do solo e das formas trocáveis, e também em formas consideradas parte da reserva do solo (formas não trocáveis e estruturais). Estas formas encontram-se em equilíbrio dinâmico e a liberação dos elementos não trocáveis e estruturais ocorrerá com a diminuição da forma trocável e com a redução nas concentrações destes elementos na solução do solo (MELO et al., 2009; CHAVES et al., 2015). No médio e longo prazos, formas estruturais poderão sofrer intemperismo, ocorrendo a dissolução dos minerais, e conseqüentemente a liberação de nutrientes para a nutrição vegetal, principalmente no caso das espécies florestais (ALVES et al., 2013; AMARAL et al., 2015).

Além da caracterização dos elementos totais e pseudototais, a análise dos teores de nutrientes biodisponíveis no solo, que simula a extração realizada pelas raízes das plantas pode ser outra metodologia complementar na caracterização da fertilidade química do solo. Este tipo de análise pode ser realizada pela extração com ácido cítrico a 1%, o qual é considerado um ácido orgânico fraco de baixa massa molar que pode ser encontrado como exsudado na região da rizosfera das plantas (PALOMO et al., 2006; OBURGER et al., 2011). Os ácidos orgânicos provenientes de plantas podem interagir com a fase sólida do solo, ocupando os sítios de adsorção de nutrientes (PAVINATO; ROSELEM, 2008). Por ser um ácido orgânico tricarbóxico, este ácido é favorecido na competição pelos sítios de retenção de nutrientes no solo, ocorrendo assim uma troca iônica (ANDRADE et al., 2003; GUPPY et al., 2005; SANTOS et al., 2008).

Contudo, a maior parte dos laboratórios de análise de rotina de fertilidade de solos do Brasil emprega o extrator Mehlich 1 e KCl 1N para a determinação dos elementos trocáveis ou disponíveis para as plantas. O extrator Mehlich 1 é composto de uma mistura de ácidos fortes em baixas concentrações, apresentando pH entre 2 e 3, sendo que o princípio do método é a dissolução ácida, mas também pode ocorrer o efeito de troca iônica nos sítios de adsorção, como é o caso, por exemplo, do íon sulfato pelo fosfato (RAIJ et al., 1987; GATIBONI et al., 2002; SANTOS et al., 2008). Já o extrator KCl 1 mol L⁻¹ é

normalmente empregado na determinação de Ca, Mg e Al por serem cátions trocáveis facilmente extraídos com soluções salinas (RAIJ et al., 1987; RAIJ et al., 1991).

Dentro deste contexto, quando é utilizada apenas a análise de rotina de fertilidade do solo, a oferta de nutrientes para as árvores pode estar sendo subestimada, fato que pode explicar a ausência de correlações entre os teores no solo e a produtividade florestal. Neste sentido, estudos com diferentes extratores para estimar a disponibilidade de nutrientes para as espécies florestais são necessários para que se possa melhor compreender as relações entre os atributos químicos do solo e a produtividade florestal. Diante destes aspectos, esta pesquisa foi desenvolvida visando atender dois objetivos:

- 1- Avaliar o efeito da fertilização sobre teores de P, K, Ca e Mg analisada com diferentes extratores no solo, sob povoamentos de *Pinus taeda*;
- 2- Avaliar as relações entre os teores de P, K, Ca e Mg no solo, extraídos com diferentes extratores químicos, e a produtividade de *Pinus taeda*;

5.3 MATERIAL E MÉTODOS

5.3.1 Caracterização da área de estudo

As áreas deste estudo situam-se em plantações com *Pinus taeda* de empresas florestais que integram o PPPIB nos estados do Paraná e Santa Catarina, nas seguintes formações geológicas conforme MINEROPAR, (2006) e CPRM, (2014): Grupo Itararé Indiviso (parcelas SC.A1; PR.A3); Grupo Guatá Formação Rio Bonito (parcela SC.A2); Grupo Paraná Formação Furnas (parcela PR.B1); Grupo Paraná Formação Ponta Grossa (parcela PR.B2); Grupo Guatá Formação Palermo (parcela PR.B3); Grupo São Bento Formação Serra Geral (parcela SC.B1); Grupo Passa Dois Formação Rio do Rastro (parcelas SC.C3).

Estas áreas estão distribuídas em 9 localidades, onde cada sítio é constituído por duas parcelas vizinhas, onde uma representa o tratamento não fertilizado (NF) e outra o tratamento fertilizado (F) totalizando desta forma 16 parcelas de estudo. As parcelas possuem aproximadamente 700 m², e são constituídas por oito linhas com doze árvores, totalizando 96 árvores plantadas

em espaçamento de 2m x 3m, sendo a bordadura da parcela constituída por duas ou mais linhas.

A fertilização nas parcelas ocorreu por volta dos oito anos de idade dos povoamentos (entre 2008 e 2009), sendo realizada a lanço por planta com os produtos e dosagens indicados na Tabela 20.

Tabela 20 - Adubação utilizada nas parcelas experimentais com *Pinus taeda* do PPPIB.

Adubo	kg ha ⁻¹	Nutriente	kg ha ⁻¹
Uréia	300	N	135
Super fosfato simples	400	P	35
Cloreto de potássio	250	K	125
Calcário Dolomítico	2000	Ca	414
		Mg	190
MICRO FTE Br 12	200	B	3,6
		Cu	1,6
		Mn	4,0
		Mo	0,2
		Fe	6,0
		S	11,4
		Zn	18,0

O clima predominante nas áreas de estudo é o Cfb (Köppen), subtropical úmido com verão ameno, chuvas uniformemente distribuídas e sem estação seca, sendo a temperatura média do mês mais quente inferior a 22°C e a temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C, com ocorrência de geadas (ALVARES et al., 2013).

5.3.2 Coleta de solo

As coletas de solo foram realizadas, entre os anos de 2017 e 2019, de forma sistemática nas linhas e entrelinhas do plantio. Foram coletados 15 pontos por parcela, em duas profundidades (0-10 e 10-20 cm), agrupando-se sempre cinco pontos em uma amostra composta, obtendo-se desta forma três repetições/profundidade/parcela. A coleta dos pontos obedeceu ao esquema representado na Figura 24.

Figura 24 – Representação dos pontos de coleta de solo (X).

12		13		36		37		60		61		84		85	
11		14		35		38		59		62		83		86	
								X							
10		15		34		39		58		63		82		87	
					X					X					
09		16		33		40		57		64		81		88	
			X											X	
08		17		32		41		56		65		80		89	
								X							
07		18		31		42		55		66		79		90	
					X					X					
06		19		30		43		54		67		78		91	
			X											X	
05		20		29		44		53		68		77		92	
								X							
04		21		28		45		52		69		76		93	
					X					X					
03		22		27		46		51		70		75		94	
			X											X	
02		23		26		47		50		71		74		95	
01		24		25		48		49		72		73		96	

Os números correspondem à identificação das árvores nas parcelas

5.3.3 Análises de solo

Rotina de fertilidade do solo

As amostras de solos foram secas em estufa a 45° C e peneiradas em malha de 2 mm. Com o auxílio de um cachimbo, utilizou-se 10 cm³ de solo para 100 ml de solução. Foram determinados os seguintes atributos químicos: P e K(extrator Mehlich I: H₂SO₄ 0,025mol L⁻¹ e HCl 0,05mol L⁻¹), Al, Ca e Mg trocáveis (extrator KCl 1 mol/L), pH CaCl₂, pH SMP e acidez potencial (H+Al) (MARQUES; MOTTA, 2003). A determinação de Ca e Mg foi realizada em espectrofotômetro de absorção atômica; K em fotômetro de chama; Al por titulação com NaOH, P por colorimetria/UV; N e C por combustão total no Analisador Elementar Vario El III.

Análise do solo com extrator ácido cítrico a 1%

Para a realização da análise do solo com o extrator ácido cítrico a 1%, utilizou-se 5 g de solo seco a 45° C e peneirado em malha de 2mm, adicionando-se 50 mL do extrator conforme metodologia adaptada de SOIL SURVEY LABORATORY METHODS MANUAL (1996). Em seguida, agitou-se a solução por duas horas e, após vinte e quatro horas, realizou-se a filtragem da solução e

posterior leitura do P, K, Ca e Mg em espectrômetro de plasma acoplado indutivamente (ICP), marca Varian, modelo 720 ES.

Análise dos elementos totais e pseudototais do solo

Para análise dos teores totais e pseudototais foram pesadas 0,25 g de amostra de solo seco a 45°C e peneirado em malha de 0,25mm. Os teores de P e K no solo foram analisados pela metodologia dos elementos totais no solo EPA 3052 (USEPA, 1996), utilizando-se 9 mL de HNO₃ e 3 mL de HF. Já a análise para Ca e Mg foi realizada pelo método dos pseudototais EPA3051 (USEPA 2007), sendo utilizado 9 mL de HNO₃ e 3 mL de HCl. A digestão para ambas as metodologias foi realizada em micro-ondas a 108 ° C e a determinação dos teores dos nutrientes foi realizada através de leitura em espectrômetro de plasma acoplado indutivamente (ICP), marca Varian, modelo 720 ES.

Análise física do solo

Para realização da análise granulométrica, foram pesadas 40 g de solo seco a 45 ° C, peneirado em malha de 2 mm, adicionando-se 200 mL de solução dispersante (hexametáfosfato de sódio), e agitando-se a solução por 16 h. A solução foi então transferida para proveta de 1 L e seguiu-se às leituras pelo método do densímetro de Bouyoucos, conforme Gee e Or (2002).

5.3.4 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro Wilk) e a comparação das médias feita por meio do teste de Tukey, considerando o nível de confiança de 95%.

Para analisar as correlações entre os nutrientes (P, K, Ca e Mg) extraídos pelas diferentes metodologias de análise do solo e a produtividade do *Pinus taeda* foi utilizado a função “chart.Corelation” do pacote “PerformanceAnalytics” (PETERSON; CARL, 2014) R 3.6.1 (R CORE TEAM, 2014). As correlações simples foram realizadas com o software Past 4.01 (HAMMER et al., 2001).

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.4.1 Efeito da fertilização sobre os teores de P, K, Ca e Mg no solo

Independente do tratamento (não fertilizado e fertilizado), a maior parte das parcelas apresentou pH muito baixo, saturação por alumínio alta a muito alta. A textura do solo variou entre média e muito argilosa, e a produtividade mostrou valores acima de 30 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (variação entre 23,50 e 45,4 m³ ha⁻¹ ano⁻¹) (APÊNDICE 3). Os teores extraídos por cada metodologia considerando a parcela e a profundidade podem ser visualizados no APÊNDICE 4.

A fertilização realizada proporcionou aumento significativo nos teores de Ca na profundidade de 0-10 cm para as três metodologias estudadas; e o Mg apresentou aumento em todas as profundidades, considerando as metodologias de extração por KCl e por ácido cítrico a 1%. Os demais elementos não apresentaram diferença estatística significativa em relação à fertilização (Tabela 21). O desvio padrão ficou alto para a maior parte dos elementos devido à dispersão dos dados, a qual foi influenciada pela diversidade do material de origem dos solos estudados.

Tabela 21 - Valores médios e desvio padrão dos teores de P, K, Ca e Mg (mg dm⁻³) extraídos por diferentes metodologias analíticas, em duas profundidades, nos tratamentos fertilizado (F) e não fertilizado (NF).

Elemento	Profundidade (cm)	Mehlich I/KCl		<i>p</i>	Acido cítrico 1%		<i>p</i>	Total/Pseudototal		<i>p</i>
		NF	F		NF	F		NF	F	
P	0-10	5 (5)	8 (6)	<i>ns</i>	18 (17)	25 (20)	<i>ns</i>	306 (109)	233 (154)	<i>ns</i>
	10-20	3 (3)	3 (1)		13 (13)	14 (16)		256 (169)	249 (150)	
K	0-10	38 (21)	44 (27)	<i>ns</i>	33 (20)	52 (30)	<i>ns</i>	2092 (2280)	2378 (2000)	<i>ns</i>
	10-20	30 (19)	31 (23)		24 (16)	30 (21)		2050 (2105)	2141 (2453)	
Ca	0-10	35 (21)	119 (71)	**	55 (63)	200 (150)	***	95 (98)	312 (257)	*
	10-20	48 (60)	76 (52)	<i>ns</i>	28 (38)	51 (48)	<i>ns</i>	64 (60)	111 (70)	<i>ns</i>
Mg	0-10	26 (6)	57 (21)	***	20 (29)	67 (34)	***	551 (584)	589 (396)	<i>ns</i>
	10-20	24 (6)	46 (13)	***	8 (4)	21 (9)	***	536 (671)	560 (486)	

ns: não significativo; * < 0,05; ** < 0,01; *** < 0,001

O efeito residual constatado apenas nos primeiros 10 cm do solo é explicado pela falta da incorporação do calcário, que foi aplicado a lanço na superfície do solo. Outro ponto a ser considerado é a camada de serapilheira

formada nas plantações com o *Pinus taeda*, a qual, conforme Adam (2015), pode promover o aprisionamento de partículas de calcário favorecendo a retenção da calagem na superfície. Considerando a metodologia de extração de elementos totais/pseudototais do solo, o Ca apresentou valores muito baixos, sendo notório o esgotamento deste nutriente no reservatório do solo após sucessivas rotações com *Pinus taeda* (BELLOTE et al., 2005; GATIBONI et al., 2020).

5.4.2 Correlações entre as metodologias de extração de nutrientes do solo

Foram identificadas correlações positivas significativas entre os teores de K (Mehlich I), Ca e Mg (KCl) e aqueles extraídos por ácido cítrico 1%. Para P não ocorreu correlação significativa entre os teores extraídos por diferentes metodologias (Figuras 25 a 28).

Figura 25 - Correlação dos teores de Ca (mg dm^{-3}) entre as metodologias ácido cítrico e KCl nas profundidades de 0-10 cm e 10-20cm.

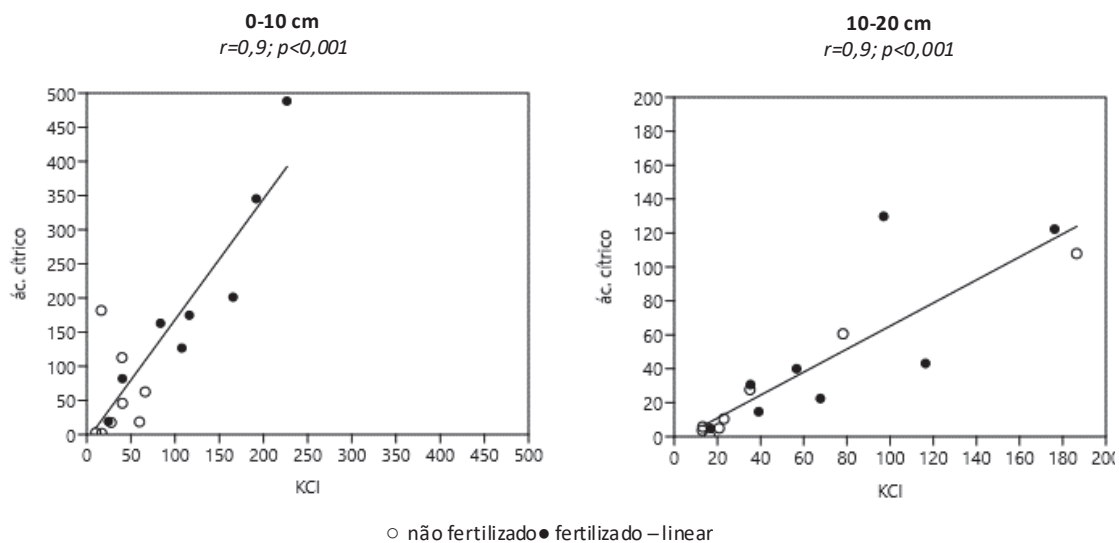


Figura 26 - Correlação dos teores de Mg (mg dm^{-3}) entre as metodologias ácido cítrico e KCl nas profundidades de 0-10 cm e 10-20cm.

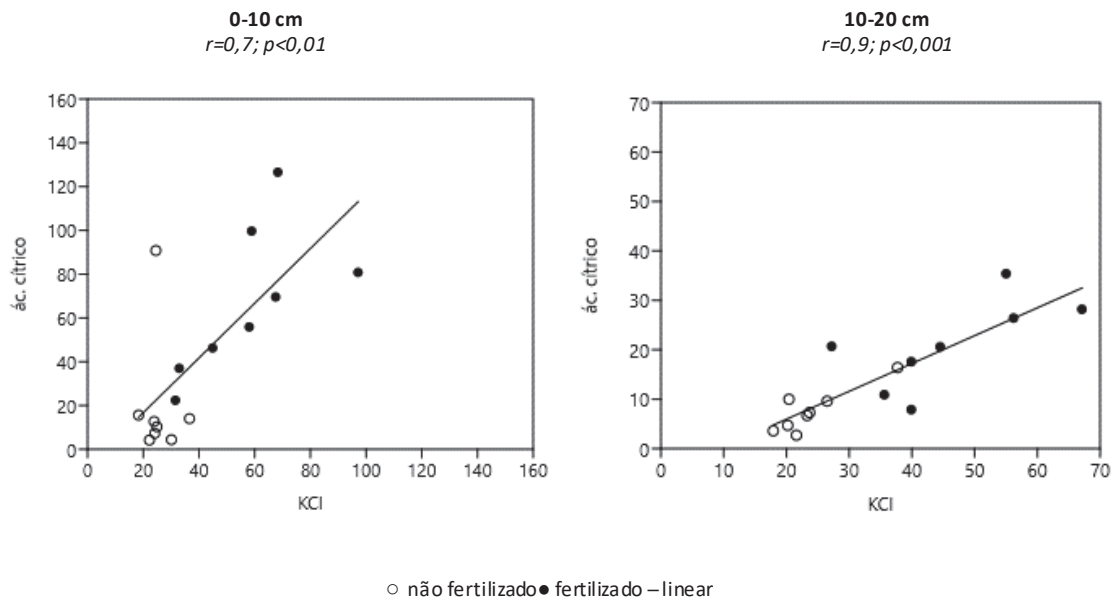


Figura 27 - Correlação dos teores de K (mg.dm^{-3}) entre as metodologias ácido cítrico e Mehlich I profundidades de 0-10 cm e 10-20cm

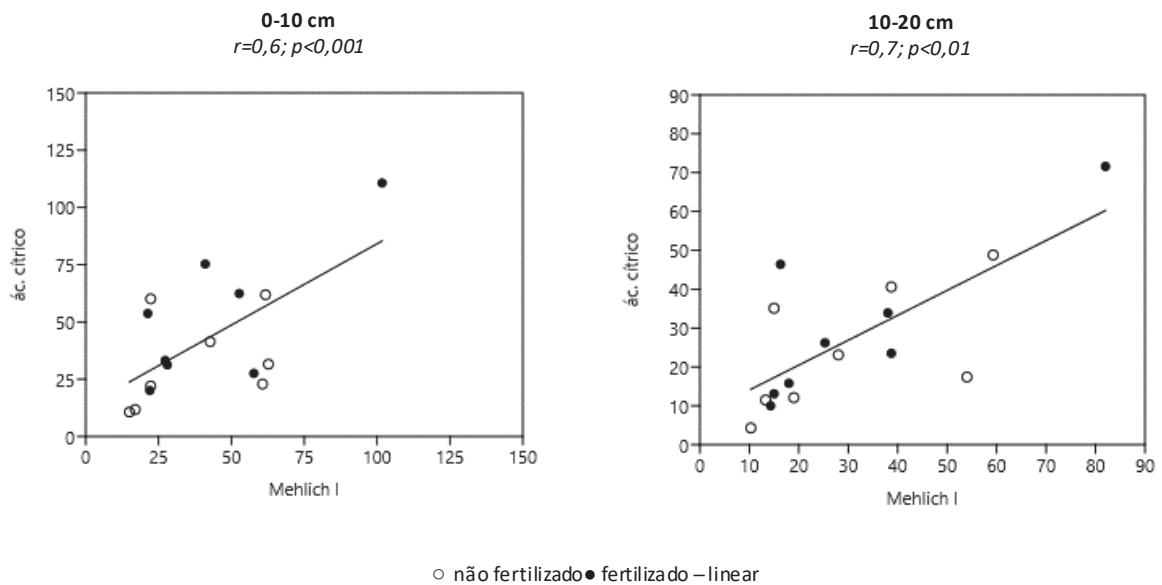
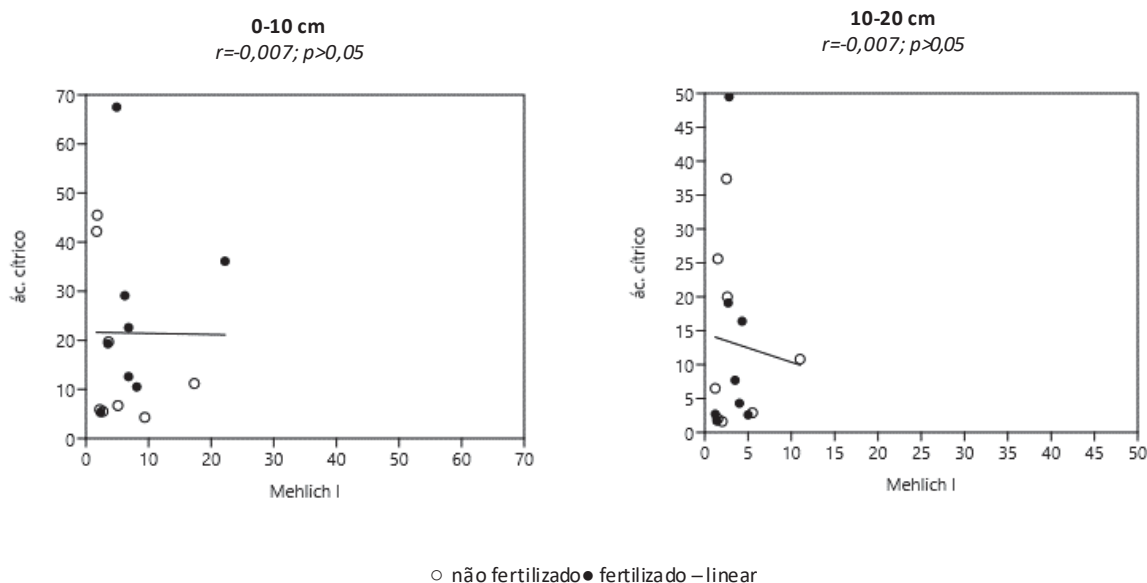
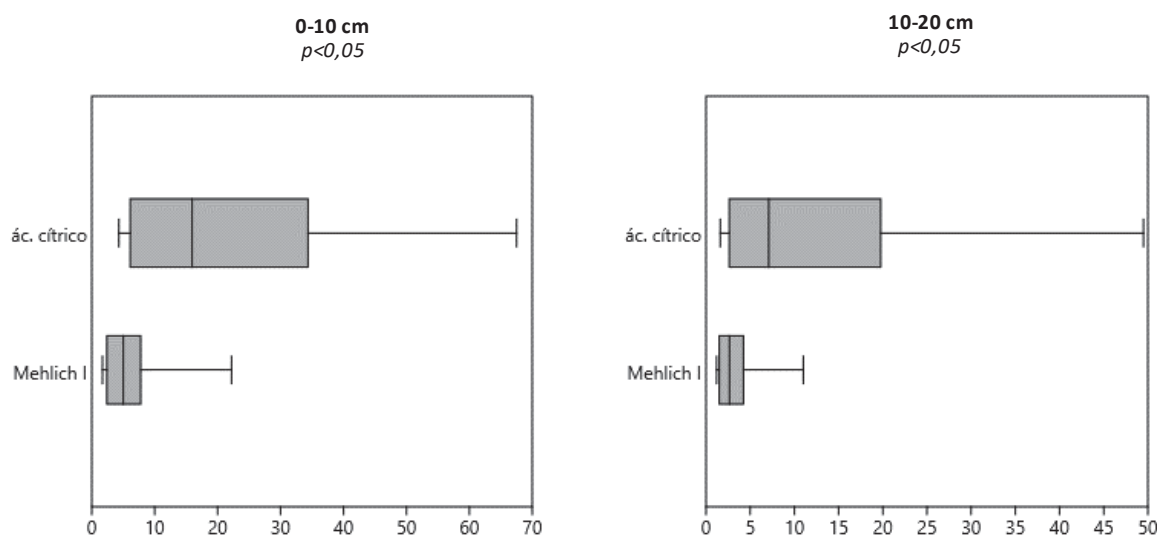


Figura 28 - Correlação dos teores de P ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) entre as metodologias ácido cítrico e Mehlich I nas profundidades de 0-10 cm e 10-20cm



Quanto aos valores absolutos extraídos pelas diferentes metodologias, observa-se para o fósforo que os teores resultantes da extração por ácido cítrico foram superiores àqueles extraídos pelo extrator Mehlich I (Figura 29).

Figura 29 – Comparação entre os valores médios de P ($\text{mg}\ \text{dm}^{-3}$) extraído pelas metodologias ácido cítrico 1% e Mehlich I nas profundidades de 0-10 cm e 10-20cm

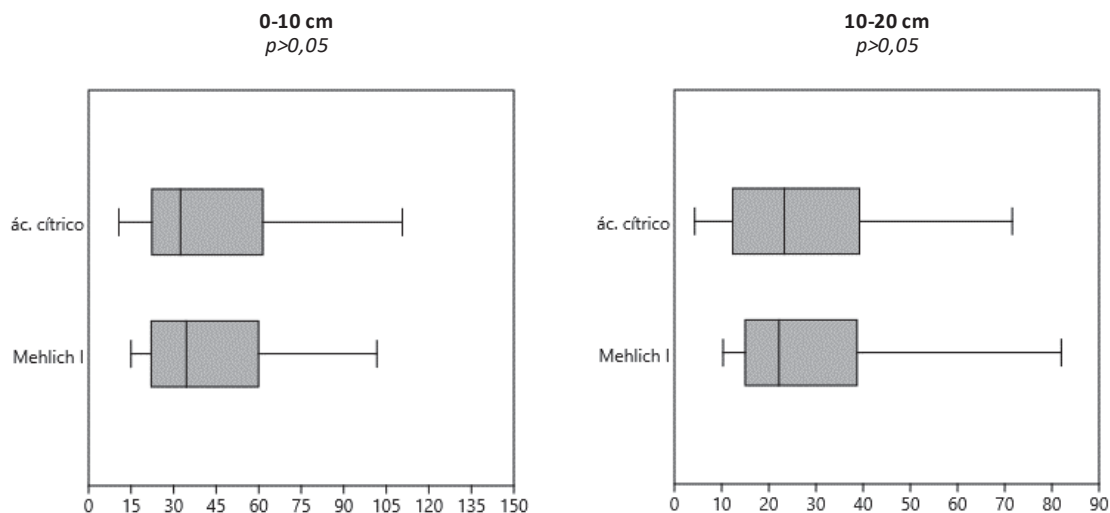


Vários autores comentam sobre a capacidade do ácido cítrico de extrair elementos complexados na matéria orgânica do solo (FRANCHINI et al., 1999; 2003; PAVINATO; ROSELEM, 2008), o que parece explicar o fato dos teores de P serem mais elevados quando foi usado o extrator ácido cítrico, comparativamente ao extrator Mehlich 1. Ou seja, o extrator ácido cítrico conseguiria extrair formas de P que não seriam extraídas pelo extrator Mehlich 1. Este último extrator apresenta uma desvantagem no caso de solos tropicais (oxídicos e cauliniticos), pois extrai mais P ligado ao Ca e apenas uma pequena porção do elemento ligado aos óxidos de Al e Fe, comuns nestes solos (RAIJ et al., 1987; 1991). Já, o ácido cítrico, por meio de seus radicais carboxílicos pode formar complexos com os óxidos de Al e Fe, reduzindo a adsorção/precipitação do P no solo (ILACO, 1981; ANDRADE et al., 2003; OBURGER et al., 2011; SOUZA, 2013). Hashimoto (2011) também observou que o ácido cítrico a 1 % extraiu teores de P do solo superiores aos extraídos pelo Mehlich 1, principalmente nas camadas superficiais, apontando o fato de que em solos ácidos e pobres em P, as plantas podem exsudar ácidos orgânicos na rizosfera que irão solubilizar os fosfatos de Fe e Al (SILVA; MENDONÇA, 2007), cujo processo se assemelharia ao efetuado pelo extrator ácido cítrico. Ainda assim, nem todo o fósforo do solo foi extraído com este extrator pois os valores totais de P no solo são bem superiores àqueles extraídos pelo ácido cítrico (APÊNDICE 4).

No caso do elemento K, os extratores Mehlich I e ácido cítrico se comportaram de forma similar (Figura 30), corroborando com Hashimoto (2011) que apontou o uso ácido cítrico a 1% como equivalente ao uso do método de rotina para este elemento. Mas ambas as metodologias resultaram em valores muito inferiores aos existentes no reservatório total de K no solo (APÊNDICE 4). Assim, formas não trocáveis de K ou presentes na estrutura de minerais primários não seriam extraídas pelos extratores Mehlich ou ácido cítrico. Os teores totais de K estão superiores aos teores encontrados por Alves et al., (2013) em LATOSSOLOS cultivados com *Pinus taeda* em material de origem do arenito Ponta Grossa, onde a reserva total de K constatada pelos referidos autores foi muito reduzida (K total inferior a 200 mg dm⁻³). Os LATOSSOLOS da formação Ponta Grossa deste estudo, parcela PR.B2 (APÊNDICE 4), apresentaram teores totais de K acima de 1000 mg dm⁻³, enquanto que os

LATOSSOLOS da formação do Grupo Itararé Indiviso, parcela PR.A3, não passaram de 550 mg dm⁻³.

Figura 30 – Comparação entre os valores médios de K (mg dm⁻³) extraído pelas metodologias ácido cítrico 1% e Mehlich I nas profundidades de 0-10 cm e 10-20cm



Não ocorreu diferença significativa entre os teores médios de Ca extraídos pelas metodologias KCl e ácido cítrico a 1% nas duas profundidades estudadas (Figura 31). Os teores de Ca obtidos nestas extrações se aproximam dos teores pseudototais de Ca (APÊNDICE 4), indicando que grande parte do Ca presente nestes solos estaria sendo obtida com estes extratores. Já para Mg, os teores resultantes da extração pelo KCl foram superiores àqueles extraídos por ácido cítrico principalmente na profundidade de 10-20cm (Figura 32), mas bem inferiores aos observados nos teores pseudototais de Mg (APÊNDICE 4), sugerindo a presença de magnésio em compartimentos do solo não acessíveis aos extratores KCl ou ácido cítrico, corroborando Gatiboni et al. (2019), que constataram em plantações com *Pinus taeda* no sul do Brasil teores de Mg (pseudototal) bem superiores aos teores trocáveis deste elemento no solo, como também superiores aos teores de Ca (pseudototal) do reservatório do solo.

Figura 31 – Comparação entre os valores médios de Ca (mg dm^{-3}) extraído pelas metodologias ácido cítrico 1% e KCl nas profundidades de 0-10 cm e 10-20cm

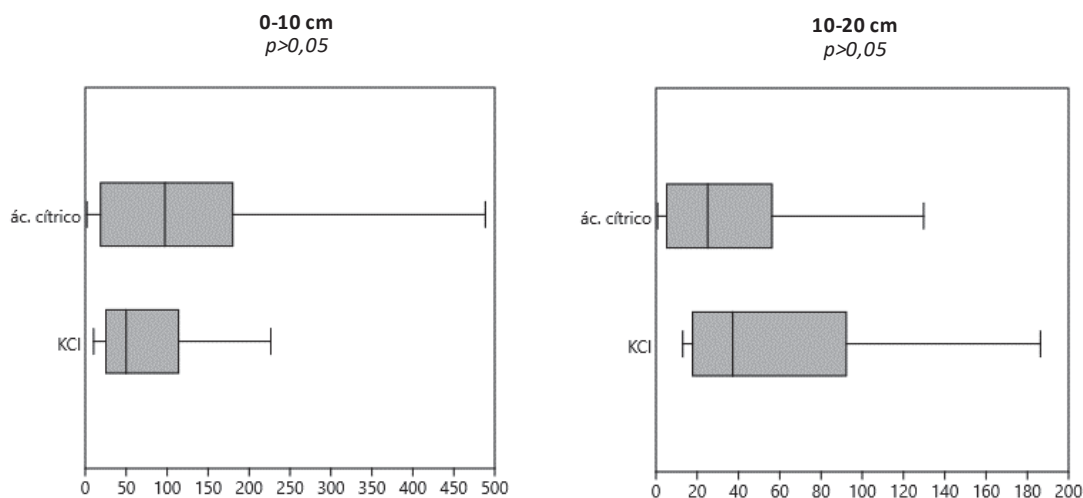
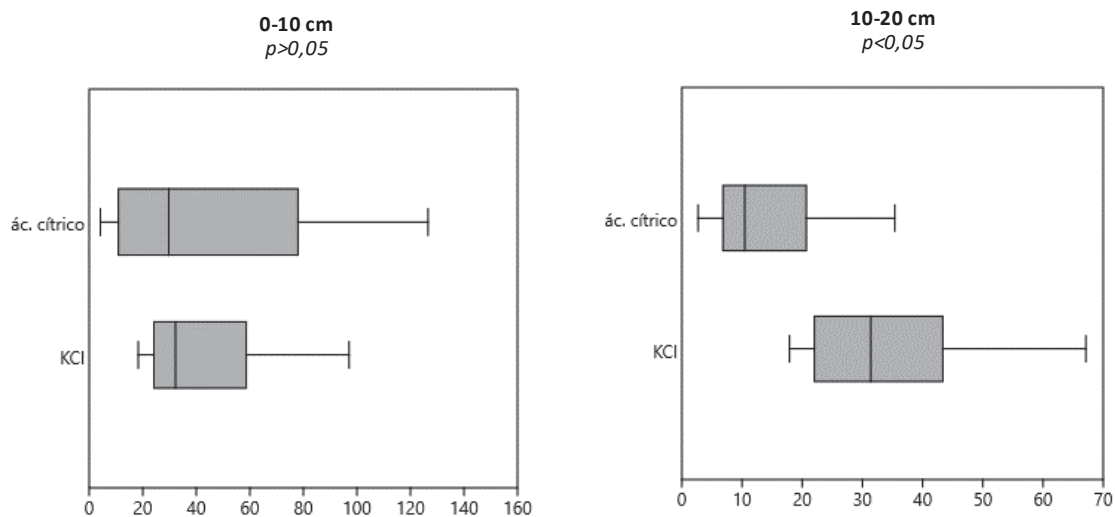


Figura 32 – Comparação entre os valores médios de Mg (mg dm^{-3}) extraído pelas metodologias ácido cítrico 1% e KCl nas profundidades de 0-10 cm e 10-20cm



Para identificar se existiam relações diretas entre os teores dos elementos presentes nos reservatórios do solo (teores totais e pseudototais) e aqueles extraídos com as metodologias Mehlich I, KCl e ácido cítrico 1%, foram realizadas análises de correlação, que se mostraram positivas e significativas apenas para cálcio (Tabela 22). Estes resultados, de certa maneira corroboram com o que foi discutido acima, indicando que o reservatório de cálcio nestes solos estaria sendo bem caracterizado com quaisquer dos extratores usados. Já,

para os demais elementos, os extratores Mehlich I, KCl e ácido cítrico estariam caracterizando apenas parte dos reservatórios de P, K e Mg nos solos.

Tabela 22 – Correlações (*r*) entre as metodologias Mehlich I/KCl e ácido cítrico com a metodologia dos teores totais (P e K) e pseudototais (Ca e Mg).

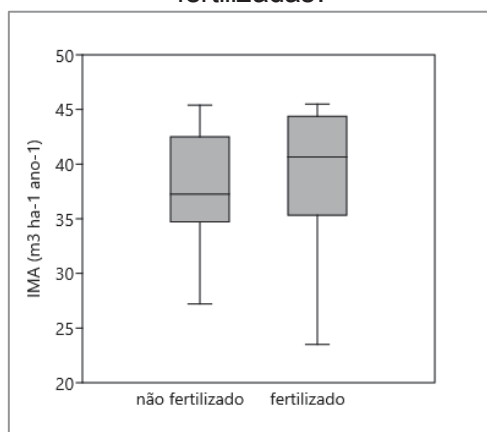
Metodologia	Total (EPA 3052)		Pseudototal (EPA 3051)	
	P	K	Ca	Mg
Mehlich 1/KCl	0,48	0,18	0,95***	0,23
Ácido cítrico a 1%	0,24	0,10	0,93***	0,14

*** $p < 0,001$

5.4.3 Avaliação da fertilização sobre o crescimento das árvores e das relações entre os teores de P, K, Ca e Mg e a produtividade do *Pinus taeda*

Ao comparar os dados de produtividade (IMA) entre áreas não fertilizadas e fertilizadas, aos treze anos de idade (cinco anos após fertilização) não foi observado efeito da aplicação de fertilizantes sobre o crescimento das árvores (Figura 33).

Figura 33 - Comparação da produtividade (IMA) entre as parcelas não fertilizadas e fertilizadas.

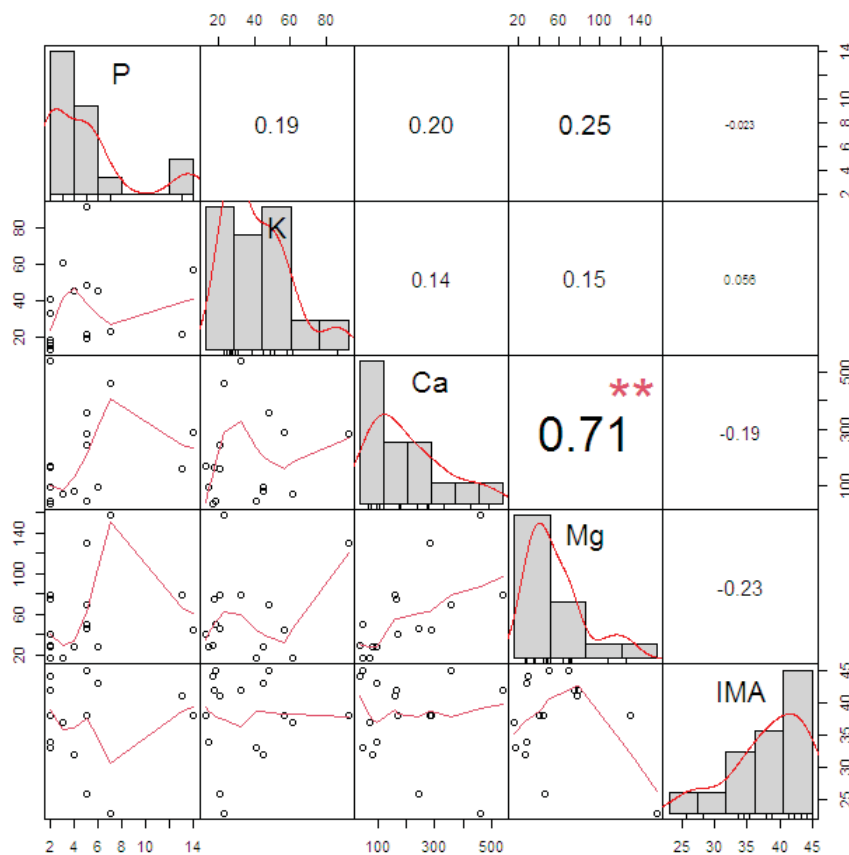


Embora neste estudo a fertilização não tenha contribuído para o incremento em produtividade, estudos demonstram que solos pobres são responsivos aos efeitos da fertilização quando se trata de plantios florestais (ALBAUGH et al., 1998; 2008; FAUSTINO et al., 2013; MORO et al., 2014; BATISTA et al., 2015; ROCHA et al., 2019). Esta ausência de resposta à

fertilização pode estar ligada a fatores como a forma de aplicação do fertilizante (à lanço sobre a serapilheira) dificultando o acesso das plantas àqueles elementos menos solúveis e de baixa mobilidade no solo; e a competição por luz e água elevadas uma vez que estes povoamentos não sofreram desbastes. A idade de aplicação do fertilizante (8 anos) também pode ter influenciado os resultados encontrados. A maior absorção de nutrientes geralmente ocorre durante a fase juvenil (LACLAU et al., 2001), e um rápido acúmulo de nutrientes pelas árvores ocorre até os quatro anos de idade, o que sugere que a fertilização nas plantações com *Pinus* deveria ser aplicada antes que as árvores atingissem essa idade (BARROS FILHO et al., 2017).

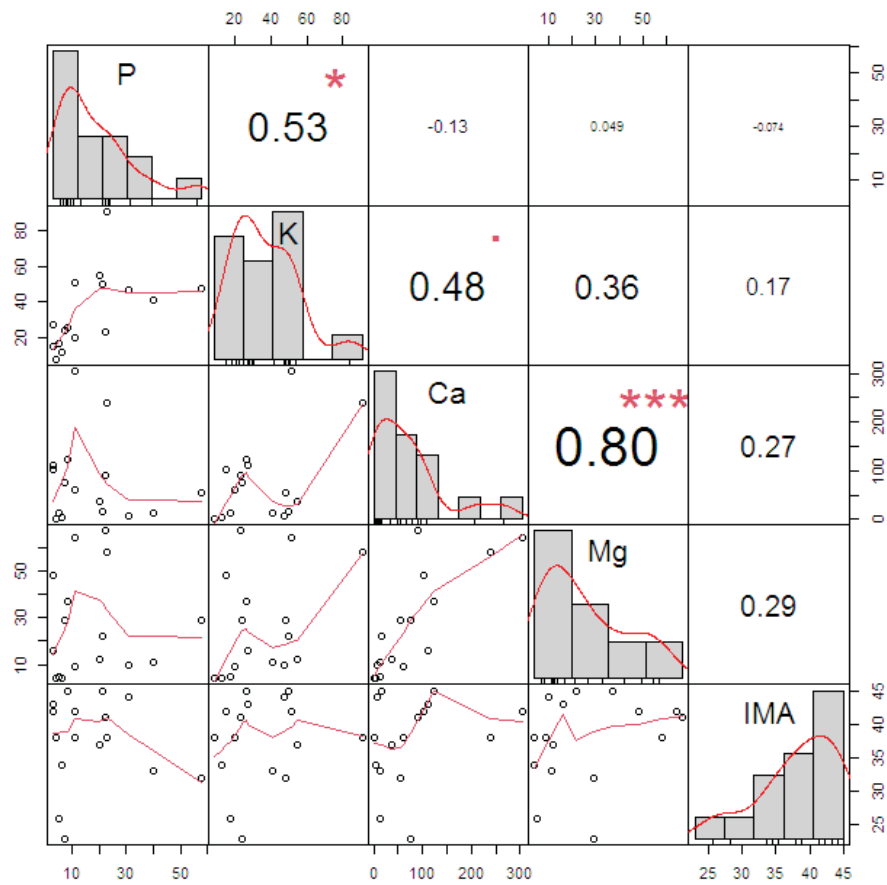
A ausência de respostas na fertilização levou às análises de correlação entre os teores dos nutrientes no solo (obtidos com diferentes extratores) e o IMA, buscando identificar possíveis relações positivas entre os nutrientes no solo e a produtividade (Figuras 34,35 e 36).

Figura 34 - Correlação entre Ca e Mg (KCl), K e P (Mehlich I) com o IMA



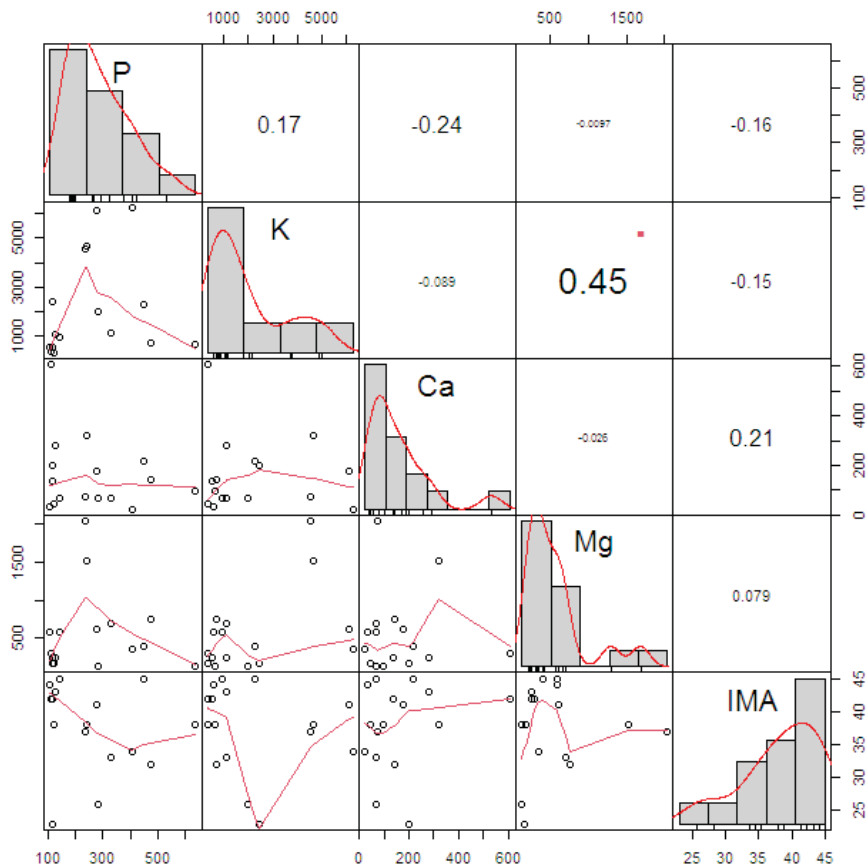
A diagonal principal apresenta os histogramas que demonstram a distribuição dos dados de cada variável. A diagonal inferior representa gráficos de dispersão da relação entre as variáveis e a diagonal superior representa a correlação e a significância das relações entre as variáveis (**<math>< 0,001</math>; * <math>< 0,01</math>; <math>< 0,05</math>).

Figura 35 - Correlação entre Ca, Mg, K e P (método ácido cítrico) e o IMA



A diagonal principal apresenta os histogramas que demonstram a distribuição dos dados de cada variável. A diagonal inferior representa gráficos de dispersão da relação entre as variáveis e a diagonal superior representa a correlação e a significância das relações entre as variáveis (**<math>< 0,001</math>; **<math>< 0,01</math>; *<math>< 0,05</math>).

Figura 36 - Correlação entre os nutrientes (Ca e Mg - método pseudototais; K e P método totais) e o IMA



A diagonal principal apresenta os histogramas que demonstram a distribuição dos dados de cada variável. A diagonal inferior representa gráficos de dispersão da relação entre as variáveis e a diagonal superior representa a correlação e a significância das relações entre as variáveis (**<math>< 0,001</math>; **<math>< 0,01</math>; *<math>< 0,05</math>).

Dentre as metodologias estudadas, a extração pelo ácido cítrico a 1% apresentou as melhores correlações positivas, ainda que fracas e não significativas, entre a produtividade (IMA) e os nutrientes Mg e Ca ($r=0,3$). A metodologia da extração pseudototal do Ca também apresentou correlação positiva fraca com o IMA ($r=0,2$).

O teor de Mg no solo pode afetar o crescimento do genero *Pinus* (REISSMANN, 1981; REISSMANN E ZÖTTL,1987; LASO GARICOITIS,1990; MENEGOL 1991; REISSMANN; WISNEWSKI, 2000; BELLOTE et al., 2005). Albought et al. (2008), em estudo considerando efeitos da adubação e irrigação em plantios com *Pinus taeda*, observou que as maiores faixas de crescimento em volume por unidade de absorção de nutrientes ocorreram para o P e Mg. Rocha et al. (2019) também apontam para o incremento em volume para os reflorestamentos que receberam Ca e Mg via fertilização e, segundo este autor,

tanto no caso do *Eucalyptus* como no do *Pinus*, a quantidade de Ca e Mg acumulada na biomassa está fortemente relacionada com o volume de madeira. O Mg é um nutriente que participa da molécula de clorofila, sendo, portanto, um elemento importante nos processos da fotossíntese, e o Ca atua na estrutura da planta como componente da parede celular, e a deficiência deste nutriente pode reduzir o crescimento dos tecidos meristemáticos (RAIJ,1991; REISSMANN;WISNEWSKI, 2000; BELLOTE et al., 2005).

Aumentos no crescimento dos plantios florestais quando submetidos a calagem não são esperados nas seguintes condições: solos jovens, pouco intemperizados, derivados de um material de origem rico em bases; sítios próximos a fontes de emissão de Ca e Mg (p.e. incêndios florestais, oceano ou indústria) (ROCHA et al., 2019). O baixo intemperismo dos solos contribui para preservar a reserva de minerais primários ou secundários, que são importantes fontes de K, Ca e Mg (RESENDE, 2007; CASTRO et al., 2010). Neste sentido, solos jovens, os quais muitas vezes são rasos, podem contribuir significativamente para o fornecimento de Ca e Mg no caso de culturas de longa rotação (ROCHA et al., 2019), como no caso das plantações florestais.

5.5 CONCLUSÕES

- ✓ A fertilização realizada nas parcelas promoveu um aumento significativo nos teores de Ca na profundidade de 0 a 10 cm considerando as três metodologias estudadas (extração por KCl; ácido cítrico a 1% e pseudototal), e no caso do Mg, este efeito foi observado apenas para as metodologias de extração por KCl e do ácido cítrico a 1%.
- ✓ As metodologias de análise de rotina (Mehlich I ou KCl) e extração pelo ácido cítrico a 1% apresentaram correlação positiva para K, Ca e Mg para as duas profundidades estudadas, sendo que no caso do K as quantidades extraídas por ambas as metodologias se equivalem. No caso do P, a metodologia do ácido cítrico 1% extraiu teores superiores quando comparado a metodologia Mehlich I.
- ✓ As metodologias pseudototal (EPA 3051), KCl e ácido cítrico apresentaram correlações muito forte em relação aos teores de Ca extraídos do solo.

- ✓ As melhores correlações positivas, ainda que fracas, foram constatadas entre IMA do *Pinus taeda* e os teores de Ca e Mg extraídos pela metodologia do ácido cítrico a 1%, e Ca extraído pelo método pseudototal.

5.6 REFERÊNCIAS

ABRÃO, S.F.; DA ROSA, S.F.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SECCO, D.; EBLING, A.A. Alterações químicas de um CAMBISSOLO HÚMICO causadas por florestamento com *Pinus taeda* em área de campo natural. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 45, n. 3, p. 455 2015.

ADAM, W.M. **Composição química da serapilheira e raízes finas de *Pinus taeda* sob fertilização e calagem**. 30 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L.; DOUGHERTY, P.; KRESS, L.; KING, J. Leaf area and above and belowground growth responses of loblolly pine to nutrient and water additions. **Forest Science**, Bethesda, v. 44, n 2, p317-328, 1998.

ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L.; FOX, T.R. Nutrient use and uptake in *Pinus taeda*. **Tree physiology**, v. 28, n. 7, p. 1083-1098, 2008.

ALBAUGH, T.J.; FOX, T.R.; RUBILAR, R.A.; COOK, R.L.; AMATEIS, BURKHART, H.E. Post thinning density and fertilization affect *Pinus taeda* stand and individual tree growth. **Forest Ecology Management**.396:207–216. 2017.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**. Hamburg, v 113, n. 3/4, p. 407-427,2013.

ALVES, M.J.F. **Reserva mineral de potássio em LATOSSOLO cultivado com *Pinus taeda* L.** 29 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

ALVES, M.J.F.; MELO, V.F.; REISSMANN, C.B.; KASEKER, J.F. Reserva mineral de potássio em Latossolo cultivado com *Pinus taeda* L. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 37:1599-1610, 2013.

AMARAL, F.H.C.; FURTINI NETO, A.E.; CURI, N.; INDA, A.V.; ARAÚJO, E.F. Produtividade de *Eucalyptus grandis* e sua relação com a cinética de liberação de macronutrientes. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 979-991, 2015.

ANDRADE, F.V.; MENDONÇA, E.S.; ALVAREZ, V.H.; NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em LATOSSOLOS e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27:1003-1011, 2003.

BATISTA, A.H.; MOTTA, A.C.V.; REISSMANN, C.B.; SCHNEIDER, T.; MARTINS, I.L.; HASHIMOTO, M. Liming and fertilisation in *Pinus taeda* plantations with severe nutrient deficiency in savanna soils. **Acta Scientiarum. Agronomy** (UEM). 1, 117, 2015.

BELLOTE, A.F.J.; SILVA, H.D.; FERREIRA, C. A.; ANDRADE, G.C. Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais. **Boletim de Pesquisa Florestal**. Embrapa. n. 37, p. 99-106. 1998.

BELLOTE, A.F.J.; TOMAZELLO FILHO, M.; DEDECEK, R.A. **Influência dos nutrientes minerais e do solo sobre a produtividade, estrutura anatômica e a densidade da madeira de *Pinus taeda***. Documentos/Embrapa Florestas, Colombo, 94p.2005.

CALVARUSO, C.; TURPAULT, M.P.; LECLERC, E.; RANGER, J.; GARBAYE, J.; UROZ, S.; FREY-KLETT, P. Influence of Forest Trees on the Distribution of Mineral Weathering-Associated Bacterial Communities of the *Scleroderma citrinum* Mycorrhizosphere. **Appl Environ Microbiol.**; 76(14): 4780–4787. 2010.

CASTRO, P.P.; CURI, N.; NETO, A.E.F.; RESENDE, A.V.; GUILHERME, L.R.G.; MENEZES, M.D.; ARAÚJO, E.F.; FREITAS, D.A.F.; MELLO, C.R.; SILVA, S.H.

G. Química e mineralogia de solos cultivados com Eucalipto (*Eucalyptus sp.*). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 88, p. 645-657, dez. 2010.

CHAVES, E.; PEDRON, F.A.; MELO, V.F.; DALMOLIN, R. Reserva mineral de K por diferentes métodos em ARGISSOLOS subtropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. vol. 39, n.4, 2015.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil/Secretaria de Geologia, Mineração e transformação mineral/Ministério de Minas e Energia, Mapa Geológico de Santa Catarina. (Escala 1:500.000). 2014.

CQFS-PR. Comissão de Química e Fertilidade do Solo. **Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná**. 2ª edição. SBCS. 289 p. 2019.

FAUSTINO, L.I.; BUFLE, 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.

FERREIRA, C. A.; SILVA, H. D.; REISSMAN, C. B.; BELLOTE, A.F.J.; MARQUES R. **Nutrição de *Pinus* no Sul do Brasil diagnósticos e prioridades de pesquisa**. Documentos/Embrapa Florestas, Colombo, 23p. 2001.

FRANCHINI, J.C.; HOFFMANN-CAMPO, C.B.; TORRES, E.; MIYAZAWA, M. & PAVAN, A. Organic composition of green manure during growth and its effect on cation mobilization in an acid Oxisol. **Comm. Soil Sci. Plant Anal.**,34:2045-2058, 2003.

FRANCHINI, J.C.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; MALAVOLTA, E. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. **Pesq. Agropec. Bras.**, 34:2267-2276, 1999.

GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S.; SAGGIN, A. Quantificação do fósforo disponível por extrações sucessivas com diferentes extratores em latossolo vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.4, p.1023-1029, 2002.

GATIBONI, L.C.; DA SILVA; W.C.; MUMBACH; G.L. et al. Use of exchangeable and nonexchangeable forms of calcium, magnesium, and potassium in soils without fertilization after successive cultivations with *Pinus taeda* in southern Brazil. **J Soils Sediments**. 2020.

GATIBONI, L.C.; VARGAS, C.O.; ALBUQUERQUE, J.A.; ALMEIDA, J.A.; STAHL, J.; CHAVES, D.M.; BRUNETTO, G.; DALL'ORSOLETTA, D.J.; RAUBER, L.P. Phosphorus fractions in soil after successive crops of *Pinus taeda* L. without fertilization. **Ciência Rural** 47:1–8. 2017.

GIANINAZZI–PEARSON, V. Plant cell responses to arbuscular mycorrhizal fungi: getting to the roots of the symbiosis. **The Plant Cell**, 8:1871–1883, 1996.

GUPPY, C.N.; MENZIES, N.W.; MOODY, P.W.; BLAMEY, F.P.C. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: A review. **Austr. J. Soil Res.**, 43:189-202, 2005.

HAMMER, Ø.; HARPER, D.A.T.; RYAN, P.D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica* 4: 1–9. 2001.

HASHIMOTO, M.O. **Avaliação de diferentes técnicas de extração de nutrientes do solo e de plantas de *Pinus taeda* L.** 64 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

IBAÑEZ, C.; NUNEZ, P.; PEZZUTTI, R.; RODRIGUEZ, F. Soil ripping and phosphorus fertilization effects on *Pinus taeda* initial growth in red soils of Northeast Corrientes Province, Argentina. **Bosque** (Valdivia), vol.25, n.2, pp.69-76, 2004.

ILACO, B.V. **Agricultural Compendium: for rural development in the tropics and subtropics**. ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY, Amsterdam, p.102-135, 1981.

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

LASO GARICOITIS, L. S. **Estado nutricional e fatores do solo limitantes do crescimento do *P. taeda* L. em Telêmaco Borba PR**. 128 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1990.

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**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 487-497, 2011.

MARQUES, R.; MOTTA, A.C.V. Análise química do solo para fins de fertilidade. In: LIMA, R.M. (Org.). **Manual de diagnóstico da fertilidade e manejo dos solos agrícola**. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, 2003. p.81-102.

MELO, V.F.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M.; NOVAIS, R.F.; FONTES, M.P.F. Formas de potássio e de magnésio em solos do Rio Grande do Sul, e sua relação com o conteúdo na planta e com a produção em plantios de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 19:165-71. 1995.

MELO, V.F.; CASTILHOS, R.M.V.; PINTO, L.F.S. Reserva mineral do solo. In: MELO, V.F.; ALLEONI, L.R.F. (Eds) **Química e Mineralogia do Solo**. SBCS, Viçosa, p. 252-321, 2009.

MENEGOL, O. **Índice de sítio e relação entre altura e teores nutricionais das acículas em povoamentos de *Pinus elliottii* var. *elliottii* no segundo planalto**

paranaense. 74 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1991.

MINEROPAR. Mapa Geológico do Estado do Paraná: unidades estratigráficas. (Escala: 1:650.000). 2006.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. UFLA 2 ed. Lavras, 729 p., 2006.

MORO, L.; GATIBONI, L.C.; SIMONETE, M.A.; CASSOL, P.C.; CHAVES, D.M. Resposta de *Pinus taeda* com diferentes idades à adubação NPK no Planalto Sul Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 1181-1189, 2014.

MORO, L.; FERREIRA, C.A.; SILVA, H.D.; REISSMANN, C.B. Exportação de nutrientes em povoamentos de *Pinus taeda* L. Baseada em volume estimado pelo sistema SISPINUS. **Floresta**. 38:465-77. 2008.

OBURGER, E.; JONES, D. L.; WENZEL, W.W. Phosphorus saturation and pH differentially regulate the efficiency of organic acid anion-mediated P solubilization mechanisms in soil. **Plant Soil**, 341:363, 2011.

OBURGER, E.; KIRK, G.J.D.; WENZEL, W.W.; PUSCHENREITER, M.; JONES, D.L. Interactive effects of organic acids in the rhizosphere. **Soil Biology & Biochemistry**. Vol. 41, p. 449-457, 2009.

OLSSON, P.A.; JAKOBSEN, I.; WALLENDER, H. Foraging and resource allocation strategies of mycorrhizal fungi in a patchy environment. In: van der HEIJDEN, M.G.A.; SANDERS, I.R., eds. **Mycorrhizal ecology: ecological studies**. Berlin, Springer-Verlag, 2002. p.93-110.

PALOMO, L.; CLAASSEN, N.; JONES, D.L. Differential mobilization of P in the maize rhizosphere by citric acid and potassium citrate. **Soil Biology & Biochemistry**. Vol. 38, p 683-692, 2006.

PAVINATO, P.S.; ROSOLEM, C.A. Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 911-920, 2008.

PETERSON, B.G.; CARL, P. PerformanceAnalytics: Econometric tools for performance and risk analysis R package version 1.4.3541, 2014. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=PerformanceAnalytics>>

R CORE TEAM, A language and environment for statistical computing v3.3. 2014.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba, Ceres/Potafos, 343p. 1991.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, O.C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas, Fundação Cargill, 170p. 1987.

REISSMANN, C.B.; WISNIEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de *Pinus*. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, p. 135-165. 2000.

REISSMANN, C.B.; ZOTTL, H.W. Problemas nutricionais em povoamentos de *Pinus taeda* em áreas de arenito da formação Rio Bonito – Grupo Guatá. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, Curitiba, v. 9, p. 75-80, 1987.

RESENDE, M.; CURI, N.; RESENDE, S.B.; CORRÊIA, G.F. **Pedologia: base para a distinção de ambientes**. Viçosa: NEPUT, 4a ed. 338p. 2002.

ROCHA, J.H.T.; DU TOIT, B.; GONÇALVES, J.L.M. Ca and Mg nutrition and its application in Eucalyptus and Pinus plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 442, n. January, p. 63–78, jun. 2019.

SANCHEZ, F.G. Loblolly pine needle decomposition and nutrient dynamics as affected by irrigation, fertilization, and substrate quality. **Forest Ecology and Management** 152, 85-96. 2001.

SANTOS, D.R.; GATIBONI L.C.; KAMINSKI J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**. 38:576-586. 2008.

SAWYER, N.A.; CHAMBERS, S.M.; CAIRNEY, J.W.G. Utilisation of inorganic and organic phosphorus sources by isolates of *Amanita muscaria* and *Amanita* species native to temperate eastern Australia. **Australian Journal of Botany**, v.51, p.151-158, 2003.

SIXEL, R.M.M.; JUNIOR, J.C.A.; GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; ANDRADE, G.R.P.; AZEVEDO, A.C.; STAHL, J.; MOREIRA, A.M. Sustainability of wood productivity of *Pinus taeda* based on nutrient export and stocks in the biomass and in the soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39(5), 1416-1427, 2015.

SOIL SURVEY LABORATORY METHODS MANUAL. **Chemical analyses citric acid extractable phosphorus (6S)** Beckmann DU-7, UV-VISIBLE spectrophotometer (6S5), p. 337-341, 1996.

SOUCHIE, E.L.; ABOUD, A.C.S.; CAPRONI, A.L. Solubilizadores de fosfato in vitro por microrganismos rizosféricos de guandu. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 2, p. 53-60, 2007.

SOUZA, L.A.B.; SILVA FILHO, G.N.; OLIVEIRA, V.L. Eficiência de fungos ectomicorrízicos na absorção de fósforo e na promoção do crescimento de eucalipto. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 39, n. 4, p. 349-355, 2004.

SMITH, S. E.; JAKOBSEN I.; GRONLUND, M.; SMITH F. A. Roles of Arbuscular Mycorrhizas in Plant Phosphorus Nutrition: Interactions between Pathways of

Phosphorus Uptake in Arbuscular Mycorrhizal Roots Have Important Implications for Understanding and Manipulating Plant Phosphorus Acquisition. **Plant Physiol.** 156:1050–1057. 2011.

TOMAZELLO FILHO, M.; KRÜGNER, T.L. Aspectos da associação micorrízica em *Pinus* spp. **Série Técnica do Instituto de Estudos Florestais**, Departamento de Silvicultura da ESALQ-USP, 3:1-32, 1982.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils and Oils – Method 3051A – SW – 846,2007.<https://www.epa.gov/sites/production/files/201512/documents/3051a.pdf>.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. Microwave Assisted Acid digestion of Sediments, Sludges, Soils and Oils – Method 3052 – SW – 846, 1996. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/3052.pdf>.

WINAGRASKI, E. **Dinâmica de ectomicorrizas em um plantio adulto de *Pinus taeda* submetido a adubação e calagem no município de Jaguariaíva, PR.** 70 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

6 CAPÍTULO III: Composição nutricional foliar e da madeira de *Pinus taeda* e suas relações com a fertilidade do solo e a produtividade florestal

6.1 RESUMO

O diagnóstico nutricional de um povoamento florestal normalmente é obtido pela interpretação dos resultados das análises foliares, juntamente com a análise de solo, e de suas relações com a produtividade. Devido à dificuldade de coleta de material foliar em florestas adultas, onde as árvores apresentam porte elevado, análises de amostras de madeira coletadas na região do câmbio poderiam eventualmente ser uma alternativa para o diagnóstico nutricional das árvores, em substituição às análises foliares. Neste sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar os teores de nutrientes em amostras de madeira e correlacionar com os teores dos mesmos nutrientes nas acículas, com os teores de nutrientes no solo e com a produtividade do *Pinus taeda*. O estudo foi desenvolvido em quatorze parcelas de estudo situadas em plantações que integram o Programa Cooperativo sobre Pesquisa do *Pinus* no Brasil (PPPIB) /Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) nos estados do Paraná e Santa Catarina. Amostras de lenho de seis árvores/parcela, foram coletadas à altura de 1,30m no tronco das árvores. Para a determinação dos teores de P, K, Ca e Mg no lenho foi realizada digestão em forno micro-ondas e o N foi determinado por combustão total. Para a caracterização dos teores de nutrientes nos tecidos foliares verdes, foram derrubadas duas árvores na bordadura de cada parcela e coletadas as acículas no terço superior da copa das árvores. A composição química das acículas foi determinada após digestão sulfúrica (N) e nitroperclórica (P, K, Ca e Mg). Foram realizadas coletas de solo até 20 cm de profundidade visando a análise de rotina de fertilidade P, K (Mehlich I) Ca e Mg (KCl 1 mol L⁻¹), análise pelo extrator ácido cítrico a 1% para P, K, Ca e Mg, e análise dos teores totais para P e K (EPA 3052) e pseudototais Ca e Mg (EPA 3051). O incremento médio anual (IMA) de cada parcela foi obtido a partir dos inventários anuais realizados pelas empresas florestais que integram o PPPIB. As parcelas fertilizadas apresentaram um aumento significativo nos teores de Ca e Mg dos tecidos do lenho. O P foi único dos elementos que apresentou correlação positiva entre os tecidos do lenho e da acícula. Ocorreu ausência de correlação entre os teores de nutrientes das acículas e os teores de nutrientes do solo. Correlação positiva significativa foi constatada entre os teores de nutrientes do lenho com os teores de nutrientes do solo com destaque para a metodologia do ácido cítrico a 1%. Não foi constatada correlação entre os nutrientes dos tecidos vegetais com a produtividade do *Pinus taeda*.

Palavras chave: nutrientes, tecidos vegetais, solo, produtividade, *Pinus taeda*

ABSTRACT

The nutritional diagnosis of a forest stand is usually obtained by interpreting the results of the leaf analyzes, together with the soil analysis, and their relationship with productivity. Due to the difficulty of collecting leaf material in adult forests, where the trees are large, analyzes of wood samples collected in the cambium region could possibly be an alternative for the nutritional diagnosis of trees, replacing leaf analyzes. In this sense, the objective of this study was to evaluate the levels of nutrients in wood samples and correlate with the levels of the same nutrients in the needles, with the levels of nutrients in the soil and with the productivity of *Pinus taeda*. The study was developed in fourteen study plots located in plantations that are part of the Cooperative Program on *Pinus* Research in Brazil (PPPIB) / Forest Research and Studies Institute (IPEF) in the states of Paraná and Santa Catarina. Samples of wood from six trees / plot were collected at a height of 1.30 m from the tree trunk. To determine the levels of P, K, Ca and Mg in the wood, digestion was performed in a microwave oven and N was determined by total combustion. For the characterization of nutrient contents in green leaf tissues, two trees were felled on the border of each plot and the needles were collected in the upper third of the treetops. The chemical composition of the needles was determined after sulfuric (N) and nitroperchloric (P, K, Ca and Mg) digestion. Soil collections were performed up to 20 cm in depth for the routine analysis of P, K (Mehlich I) Ca and Mg fertility (KCl 1 mol L⁻¹), citric acid 1% extractor analysis for P, K, Ca and Mg, and analysis of the total contents for P and K (EPA 3052) and pseudo-totals Ca and Mg (EPA 3051). The average annual increment (AAI) of each plot was obtained from the annual inventories carried out by the forestry companies that are part of the PPPIB. The fertilized plots showed a significant increase in the Ca and Mg contents of the wood tissues. The P was the only one of the elements that showed a positive correlation between the wood and the leaves. There was no correlation between the nutrient content of the needles and the nutrient content of the soil. Significant positive correlation was found between the nutrient content of the wood and the nutrient content of the soil, with emphasis on the 1% citric acid methodology. No correlation was found between the nutrients in plant tissues and the productivity of *Pinus taeda*.

Keywords: nutrients, plant tissues, soil, productivity, *Pinus taeda*

6.2 INTRODUÇÃO

A combinação dos resultados das análises de nutrientes no tecido vegetal com aqueles da análise de solo, costuma ser uma ferramenta importante para o conhecimento da nutrição e seu reflexo na produtividade florestal. Este conhecimento pode nortear a indicação da adubação adequada em termos de quantidade de nutrientes e época exigida pelas árvores (LASO GARICOITIS, 1990; BELLOTE; SILVA, 2000; BELLOTE et al., 2005; LONDERO et al., 2011).

Os teores de nutrientes são maiores no compartimento das folhas das árvores, parte metabolicamente mais ativa em função de processos como evapotranspiração e fotossíntese (VAN DEN DRIESSCHE, 1984). A translocação de nutrientes dos tecidos vegetais (ciclagem interna) é um mecanismo que pode favorecer as plantações florestais que se desenvolvem em solos de baixa fertilidade (LACLAU et al., 2001; TURNER; LAMBERT, 2014) e pode ser observada frequentemente para elementos com maior mobilidade na planta como N, K e P (BELLOTE et al., 2005; BARROS FILHO et al., 2017).

Nas espécies florestais, a absorção de nutrientes é maior durante a fase juvenil (LACLAU et al., 2001; BARROS FILHO et al., 2017) sendo que este processo leva em conta a necessidade da planta por nutriente, a velocidade de crescimento, a translocação interna do nutriente e a disponibilidade no solo (PENNINCKX et al., 2001).

Apesar de existirem trabalhos na literatura sugerindo faixas de teores de nutrientes adequadas nas folhas (REISSMAN, 1987; BELLOTE et al., 2005; LÚCIO et al., 2010; BARROS FILHO et al., 2017; VOGEL et al., 2018), geralmente são fracas as correlações entre os teores de nutrientes das acículas do *Pinus taeda* e a produtividade (BELLOTE et al., 2005). Em povoamentos com *Pinus taeda* pode ser constatada a correlação positiva entre a produtividade da biomassa do lenho e o índice de área foliar (ALLEN et al., 2005; MUNHOZ, 2015), pois a variação da produção de biomassa, em termos ecofisiológicos, depende da variação na interceptação de luz, sendo esta dependente da área foliar (LANDSBERG; GOWER 1997; FOX et al., 2007; SAMUELSON et al., 2014), a qual pode ser afetada pela disponibilidade de nutrientes no solo (ALBAUGH et al. 1998; 2004).

As correlações entre os teores de nutrientes nas folhas e os teores dos nutrientes no solo podem ser influenciadas pelas metodologias empregadas nas análises laboratoriais. Nas análises de rotina de fertilidade do solo no Brasil, normalmente emprega-se a metodologia Mehlich I para extração de P e K, e o extrator KCl para Ca e Mg, mas estudos com o uso do extrator ácido cítrico a 1% indicam que o mesmo seria bastante promissor para caracterizar as relações entre nutrientes no solo e nos tecidos vegetais (REISSMANN; ZÖTTL, 1987), o que em parte é comprovado na presente tese (vide Capítulo II).

Uma dificuldade na realização da análise nutricional foliar de plantações florestais está na obtenção de tecido vegetal das acículas quando os povoamentos são adultos, devido à altura das copas. A análise de material de tronco poderia ser uma opção, mas deve-se evitar o uso de métodos destrutivos (derrubada de árvores), o que pode tornar a operação bastante trabalhosa e com custos elevados (BELLOTE; SILVA, 2000). A obtenção de tecido vegetal por meio de coleta de apenas uma porção do lenho, realizada no fuste, facilitaria o procedimento para a realização do diagnóstico nutricional dos plantios florestais.

Donha (2016), realizando estudos de dendronutrição, verificou que diversas espécies arbóreas da Floresta Atlântica apresentaram maior concentração de nutrientes nos dois últimos anéis de crescimento (próximos ao córtex), fato relacionado ao transporte da seiva pelos vasos de formação mais recente. Rodriguez et al. (2018), em estudo nesta mesma linha, com *Pinus taeda*, observaram aumento de K na região próxima à casca; nenhuma tendência radial no caso do P; e decréscimo de Ca nos anéis de crescimento considerando a direção medula-casca. Considerando estes estudos, a possibilidade de correlacionar teores de nutrientes da madeira na região mais externa (próximo ao córtex) com teores de nutrientes no solo, com os teores foliares e com a produtividade pode representar um avanço no diagnóstico nutricional das árvores.

Neste sentido, esta pesquisa teve os seguintes objetivos:

1. Avaliar o efeito da fertilização sobre os teores de nutrientes nas acículas e na madeira de *Pinus taeda*;
2. Avaliar as relações entre os teores de N, P, K, Ca e Mg no solo e os teores foliares destes elementos em árvores de *Pinus taeda*;

3. Avaliar as relações entre os teores de N, P, K, Ca e Mg no solo e os teores destes elementos na madeira do câmbio de *Pinus taeda*.

4. Avaliar as relações entre os teores de N, P, K, Ca e Mg nas acículas e na madeira com a produtividade de *Pinus taeda*.

6.3 MATERIAL E MÉTODOS

6.3.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi desenvolvido em áreas das empresas florestais que integram o PPPIB, localizadas nos estados do Paraná e Santa Catarina, sobre as seguintes formações geológicas, conforme MINEROPAR (2006) e CPRM, (2014): Grupo Itararé Indiviso (PR.A3); Grupo Paraná Formação Furnas (PR.B1); Grupo Paraná Formação Ponta Grossa (PR.B2); Grupo Guatá Formação Palermo (PR.B3); Grupo São Bento Formação Serra Geral (SC.B1; SC.B3); Grupo Passa Dois Formação Rio do Rastro (SC.C3).

Foram analisadas as parcelas dos tratamentos não fertilizado (NF) e fertilizado (F), totalizando assim doze parcelas de estudo. As parcelas possuem aproximadamente 700 m², apresentando um total de 96 árvores (oito linhas com doze árvores) plantadas em espaçamento de 2m x 3m, sendo a bordadura constituída por duas ou mais linhas. O Incremento Médio Anual (IMA) de cada parcela foi obtido do banco de dados do IPEF, a partir dos inventários anuais realizados pelas empresas florestais que integram o PPPIB, com base aos treze anos de idade das plantações.

O clima predominante nas áreas de estudo é o Cfb (Köppen), subtropical úmido com verão ameno, chuvas uniformemente distribuídas e sem estação seca, sendo a temperatura média do mês mais quente inferior a 22°C, e a temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C, com ocorrência de geadas (ALVARES et al., 2013).

6.3.2 Coleta e análises de solo

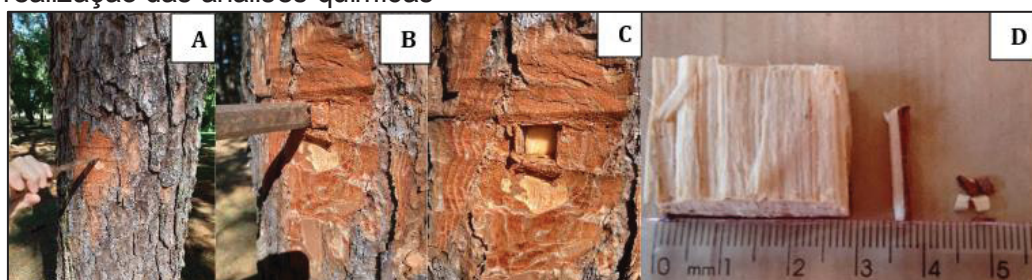
A coleta e as análises para rotina de fertilidade do solo (Mehlich 1/KCl), N (combustão total), análises pelo extrator ácido cítrico a 1%, bem como a

determinação dos teores totais (EPA 3052) e pseudototais (EPA 3051) de nutrientes no solo seguiram os mesmos procedimentos descritos no Capítulo II desta tese.

6.3.3 Coleta e análise do material lenhoso

Visando a caracterização dos teores de nutriente na madeira, amostras de lenho foram coletadas nas plantações com aproximadamente dezoito anos de idade (verão de 2019). Seis árvores (duas no início, duas no meio e duas no final de cada parcela) foram selecionadas e então coletadas amostras de lenho no fuste das árvores à altura de 1,30 m do solo, com auxílio de um formão, retirando-se o excesso de casca, porém sem remover totalmente a camada do córtex. Foram coletados blocos de madeira de aproximadamente 1 cm de espessura (Figura 37).

Figura 37 - Coleta do lenho (A, B e C) e porção da amostra (D) retirada para a realização das análises químicas



As amostras foram secas em temperatura ambiente e, então, foram manipuladas, destacando-se uma porção central dos blocos de 3 a 4 mm na região do cambio abrangendo uma parte do xilema e do córtex. As amostras foram picotadas em pedaços de 2 mm ou menos, ficando prontas para a digestão.

Para a determinação de nutrientes no lenho, pesou-se 200 mg do material vegetal picotado e realizou-se a digestão em forno micro-ondas, utilizando-se 6,0 mL de HNO₃ 50% e 2,0 mL de H₂O₂ (adaptado de DONHA, 2016), com posterior leitura de P, K, Ca e Mg em espectrômetro de plasma acoplado indutivamente (ICP), marca Varian, modelo 720 ES. O nitrogênio (N) e o carbono (C) foram determinados por combustão total no Analisador Elementar Vario El III.

6.3.4 Coleta e análise das acículas maduras

Os resultados das análises foliares foram procedentes de pesquisas anteriores dentro do PPPIB, sendo estas informações obtidas a partir do banco de dados do IPEF.

A coleta das acículas foi realizada quando as plantações estavam com aproximadamente quatorze anos de idade (verão de 2016), através da derrubada de 2 árvores médias a dominantes, nas bordaduras das parcelas. Para cada árvore foi escolhido um galho em cada ponto cardinal (norte, sul, leste e oeste), no início do terço superior da árvore, e foram retiradas todas as acículas do 2º ou 3º rebento (evitando-se a coleta de acículas muito jovens ou velhas e selecionando-se aquelas livres do ataque de pragas ou doenças).

As amostras foram secas em estufa de ventilação forçada a 65° C durante 5 dias. Para a determinação química dos nutrientes nas acículas foram realizadas as digestões sulfúrica (N) e nitroperclórica (P, K, Ca e Mg), sendo a leituras realizadas em fotômetro de chama (K), espectrofotômetro na faixa visível - colorimetria (P) e espectrofotômetro de absorção atômica (Ca e Mg). A determinação de N foi pelo método Kjeldhal que envolve destilação do digerido e posterior titulação (TEDESCO et al., 1995).

6.3.5 Análises estatísticas

Foram realizadas correlações lineares (Pearson) entre os teores dos nutrientes nos tecidos vegetais (lenho e acículas); e destes com a produtividade do *Pinus taeda*. Para correlacionar os teores de nutrientes dos tecidos vegetais e os teores de nutrientes no solo foram ajustadas equações de regressão linear e quadrática. A comparação da composição química do lenho entre as parcelas foi realizada pelo teste de Kruskal-Wallis. Para todas as análises foi considerado o nível de probabilidade de 5%, sendo utilizados o programa estatístico Past 4.01 (HAMMER et al., 2001).

6.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.4.1 Teores de nutrientes nos tecidos vegetais e a relação com a produtividade

Considerando os elementos móveis nos tecidos vegetais (N, P, K e Mg) os teores no lenho foram inferiores àqueles observados nas acículas (Tabela 23), devido a intensificação na ciclagem interna destes nutrientes que apresentam maior mobilidade no floema (BARROS FILHO et al., 2017). O Ca, elemento com baixa mobilidade na planta, apresentou teores no lenho, para algumas amostras, próximos daqueles observados nas acículas.

Tabela 23 – Teores de nutrientes no lenho e nas acículas de *Pinus taeda* das parcelas de estudo, considerando os tratamentos não fertilizado (NF) e fertilizado (F).

Parcela	Trat.	Lenho (g kg ⁻¹)					Acículas (g kg ⁻¹)					IMA m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹
		N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg	
PR.B1	NF	2,1	0,2	1,2	1,6	0,3	14	1,0	3,0	2,1	0,6	38
PR.B1f	F	2,6	0,3	1,1	2,4	0,4	17	1,2	3,5	2,5	1,2	45
PR.B2	NF	2,8	0,2	0,7	1,5	0,3	19	1,2	4,1	2,8	0,6	26
PR.B2f	F	2,7	0,2	0,9	2,3	0,4	17	0,8	4,9	1,8	0,4	23
PR.B3	NF	2,0	0,2	1,4	2,2	0,4	21	1,2	4,6	1,8	0,6	43
PR.B3f	F	2,1	0,2	1,4	2,2	0,6	20	1,1	3,0	1,9	0,5	42
SC.B1	NF	2,1	0,1	0,8	0,9	0,3	18	1,1	4,6	1,0	0,6	33
SC.B1f	F	2,3	0,3	1,5	1,0	0,5	18	1,4	3,2	0,9	0,5	32
SC.B3	NF	2,3	0,2	0,7	1,3	0,5	16	1,2	2,2	2,7	0,7	43
SC.B3f	F	3,2	0,2	1,0	1,7	0,6	16	1,2	3,5	2,9	0,9	53
PR.A3	NF	3,1	0,3	0,7	1,5	0,4	14	2,5	6,5	3,4	1,8	38
PR.A3f	F	3,4	0,3	0,7	2,0	0,4	16	2,5	6,3	4,1	2,7	42
SC.C3	NF	3,4	0,4	2,5	1,2	0,4	15	2,5	5,8	3,7	2,7	37
SC.C3f	F	3,5	0,4	1,8	2,4	0,7	16	1,4	5,5	2,0	1,0	38
valores médios	NF	2,5a*	0,2a	1,1a	1,5b	0,4b	17a	1,5a	4,4a	2,5a	1,1a	37a
	F	2,8a	0,3a	1,2a	2,0a	0,5a	17a	1,4a	4,3a	2,3a	1,0a	39a

* Médias seguidas por letras distintas, na vertical, indicam diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade.

Ao se comparar os teores de nutrientes no lenho entre os tratamentos (NF e F), observa-se que apenas Ca e Mg mostraram teores mais elevados nas parcelas fertilizadas, indicando a capacidade das amostras de lenho em diagnosticar o efeito residual da aplicação de calcário no solo, cujos teores estavam mais elevados nas áreas fertilizadas (vide Capítulo II). Van den Driessche (1984) cita exemplos de estudos sobre a composição química de tecidos do lenho, os quais também apontam o aumento nos teores de nutrientes destes tecidos após a realização da fertilização.

As faixas dos teores de nutrientes nas acículas do *Pinus* assemelham-se às daquelas de outras pesquisas; já no caso do lenho, os valores encontrados mostram-se superiores (Tabela 24), possivelmente devido à forma de coleta do tecido vegetal, na região do câmbio no caso do presente estudo. Amostras que correspondem às camadas mais periféricas do alburno (região próxima ao córtex) como as utilizadas nesta pesquisa, constituem-se de tecidos fisiologicamente mais ativos e, portanto, com maior fluxo de nutrientes (BELLOTE et al., 2005; DONHA, 2016).

Tabela 24 - Teores de nutrientes nas acículas e lenho de *Pinus taeda*, em outras pesquisas e no presente estudo.

Tecido vegetal	Idade	N	P	K g kg ⁻¹	Ca	Mg	Fonte
Acículas	8	15-22	1,3-2,0	6,0-12,0	1,0-5,0	1,0-2,0	Zöttl, 1979 *
	8	18-23	1,3-1,4	7,0-11,0	0,8-3,0	0,8-1,5	Reissmann, 1981 *
	20	17-21	0,8-0,9	3,7-5,9	0,7-2,2	0,6-1,0	Bellote et al., 2005
	-	11,4	1,1	4,7	3,1	1,2	Lúcio et al., 2010
	8	16-17	1,1-1,3	4,9-5,8	2,0-3,3	0,9-1,2	Barros Filho et al., 2017
	1,9	15	1,6	8,7	2,6	0,8	Vogel et al., 2018
	16	14-21	0,8-2,5	3,0-6,5	0,9-4,1	0,4-2,7	Este estudo
Lenho	10	1,1-1,8	0,1-0,2	0,6-0,8	0,7-0,8	0,2	Valeri, 1987
	-	1,43	0,1	0,6	0,7	0,3	Lúcio et al., 2010
	8	0,6	0,04	0,4-0,6	0,4-0,5	0,2	Barros Filho et al., 2017
	17	-	0,07	0,1-0,5	0,4-1,6	-	Rodriguez et al., 2018
	18	2,0-3,5	0,1-0,4	0,7-2,5	0,9-2,4	0,3-0,7	Este estudo

*citado por REISSMANN, 1987

Para as correlações entre os teores de nutrientes nos tecidos vegetais, os resultados indicaram correlação positiva significativa entre os teores de P nas folhas e no lenho; e negativas para os teores de N entre estes tecidos vegetais. Para K, Ca e Mg não foram observadas correlações significativas entre os teores foliares e aqueles presentes na madeira, possivelmente a diferença de idade em que os dois tecidos vegetais foram coletados pode ter influenciado os resultados. Os teores de nutrientes nos tecidos vegetais podem sofrer variações dependendo da idade das árvores, posição e época da amostragem dos tecidos,

tipo de solo, fatores climáticos, dentre outros fatores (CALDEIRA et al., 1999; PIATEK; ALLEN, 2000; FERREIRA et al., 2001; VIERA, SCHUMACHER 2009).

Não foi observada correlação positiva significativa entre os teores de N, P e K dos tecidos vegetais com a produtividade, corroborando com as observações de Bellote et al. (2005) que constataram ausência relações diretas entre o estado nutricional do *Pinus* e suas variáveis dendrométricas. Entretanto, foram observadas correlações positivas (embora fracas) entre os teores de Ca e Mg nos tecidos vegetais e a produtividade (IMA aos 13 anos) dos povoamentos florestais (Tabela 25).

Tabela 25 - Correlação linear entre os teores de nutrientes nos tecidos e a produtividade do *Pinus taeda*

Nutriente	Folha e Lenho	Lenho e IMA	Folha e IMA
N	-0,52	0,09	-0,11
P	0,63*	0,09	0,14
K	0,13	0,06	-0,19
Ca	0,08	0,21	0,31
Mg	-0,09	0,41	0,23

* ($p < 0,05$)

6.4.2 Relações entre teores de nutrientes no solo e nos tecidos vegetais

As correlações entre os teores de nutrientes nas acículas e os teores do solo foram negativas ou muito fracas (Tabela 26), apesar de existirem resultados positivos na literatura com relação ao extrator ácido cítrico (REISSMANN; ZÖTTL, 1987), o qual seria, por estes autores considerado um método bastante promissor para pesquisas em áreas de florestas.

Foram observadas correlações positivas significativas entre os teores de nutrientes no lenho e os teores no solo para K, Ca e Mg extraídos com ácido cítrico a 1%, e apenas para K e Ca no caso dos demais extratores (Tabela 26). Os nutrientes presentes no lenho, coletado na região do córtex, parecem refletir melhor os nutrientes disponíveis no solo. Os teores dos nutrientes nas folhas de plantas adultas não resultam apenas dos nutrientes extraídos do solo, mas também de processos de redistribuição interna nas árvores e mesmo da captura

de nutrientes da atmosfera, via absorção foliar (TURNER; LAMBERT, 2014; JOHNSON; TURNER, 2019), o que dificulta o estabelecimento de relações diretas entre os teores de nutrientes no solo e aqueles presentes nas folhas/acículas.

Este comportamento sugere que os resultados obtidos com o extrator ácido cítrico a 1% e com a análise da madeira poderiam ser boas ferramentas para o diagnóstico nutricional dos elementos K, Ca e Mg em povoamentos *Pinus taeda*. Apesar do potencial uso destas metodologias analíticas no diagnóstico nutricional, não foram observadas correlações estreitas com produtividade, seja entre teores no solo e produtividade (Capítulo II; Figura 35), seja entre teores na madeira e produtividade (Tabela 25).

Tabela 26 - Correlação linear entre os teores nutrientes extraídos do solo por diferentes metodologias e os teores de nutrientes nos tecidos vegetais de acículas e de madeira.

Tecido vegetal	Nutriente	Mehlich I/KCl	Ácido cítrico 1%	Totais e pseudototais
Acículas	N	-	-	0,26
	P	-0,50	-0,12	-0,33
	K	-0,21	-0,14	0,29
	Ca	-0,08	-0,16	-0,27
	Mg	-0,17	-0,002	0,40
Lenho	N	-	-	-0,40
	P	-0,20	0,04	-0,06
	K	0,73**	0,72**	0,64**
	Ca	0,68**	0,67*	0,63**
	Mg	0,48	0,80***	0,39

*($p < 0,05$); **($p < 0,01$); ***($p < 0,001$)

Levando em conta as relações apresentadas na Tabela 26, foram ajustadas as equações de regressão entre os teores de nutrientes no tecido vegetal do lenho e os teores do solo (Figuras 38,39 e 40), que permitem obter estimativas dos teores de nutrientes no lenho em função daqueles existentes no solo e vice-versa.

Figura 38 – Equações de regressão ajustadas entre teores de K no solo e os teores de K no lenho de *Pinus taeda*

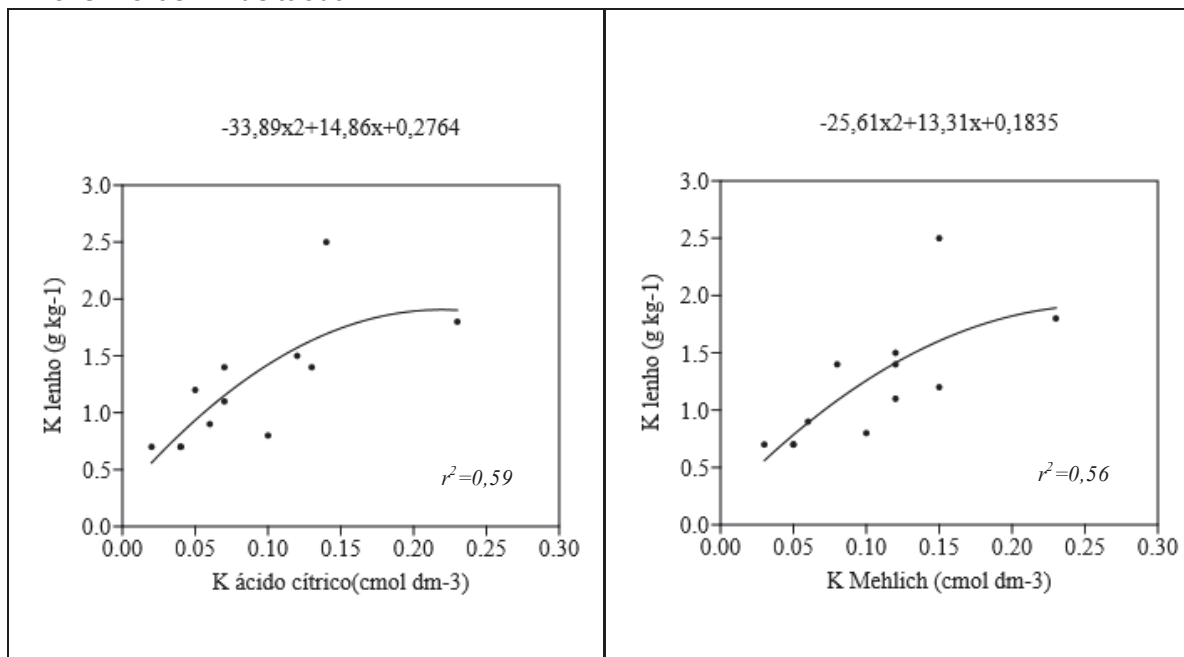


Figura 39 - Equações de regressão ajustadas entre teores de Ca no solo e teores de Ca no lenho de *Pinus taeda*

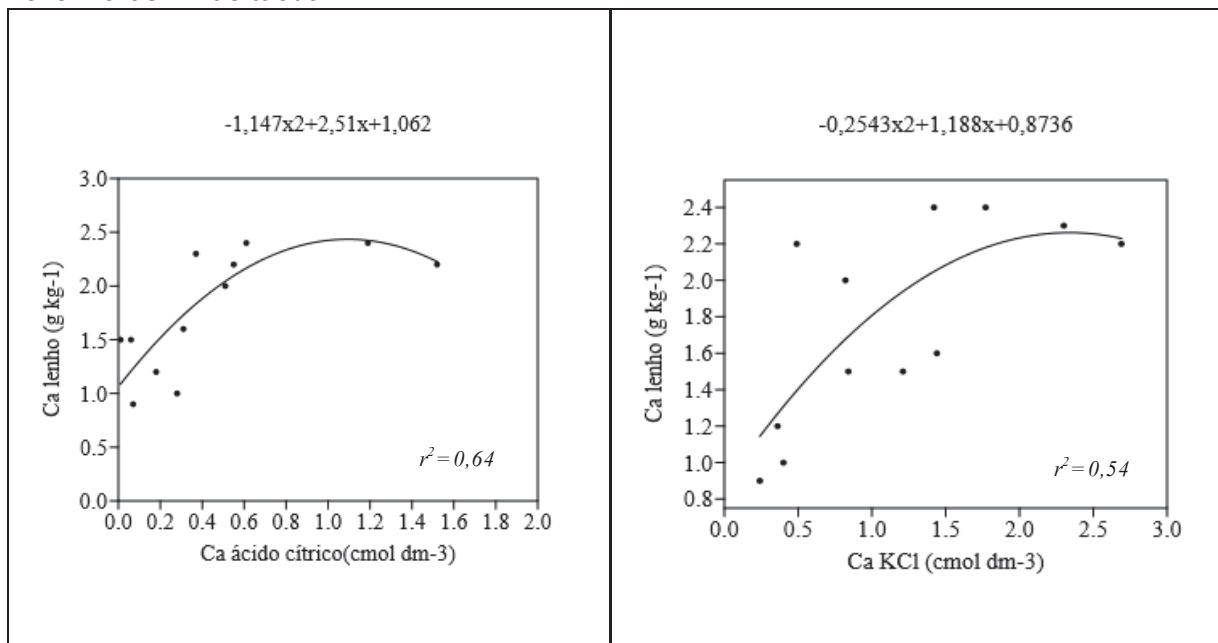
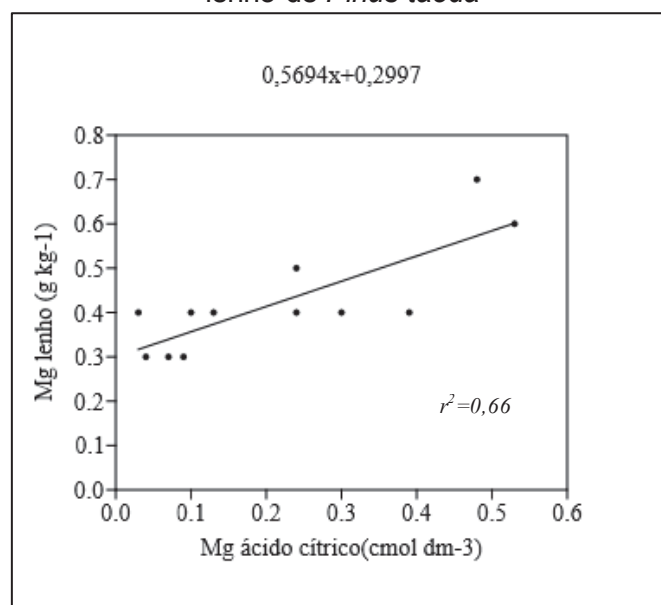


Figura 40 - Equação de regressão ajustada entre o teor de Mg no solo e teor de Mg no lenho de *Pinus taeda*



Reissmann (1981) aponta que os níveis críticos do *Pinus taeda* para nutrientes do solo extraídos com ácido cítrico a 1 %, baseando-se em sintomas visíveis de deficiência, são $K < 10 \text{ ppm}$; $Ca < 30 \text{ ppm}$ e $Mg < 10 \text{ ppm}$. Esta abordagem considera uma situação onde as plantas já estavam com extrema carência nutricional. No caso deste capítulo, as parcelas que apresentaram valores dos nutrientes no solo abaixo dos níveis críticos sugeridos pelo referido autor foram algumas das parcelas que não receberam a fertilização, sendo elas: parcela PR.A3 situada na formação do grupo Itararé Indiviso para K, Ca e Mg; parcela PR.B2 situada na formação Grupo Paraná Formação Ponta Grossa para Ca e Mg; PR.B1 situada no Grupo Paraná Formação Furnas para Mg e SC.B1 Grupo São Bento Formação Serra Geral para Ca. As parcelas PR.A3, PR.B1 e PR.B2 estão situadas sobre solos de textura média (menos que 350 g kg^{-1} de argila) o que pode implicar na menor retenção dos cátions (K, Ca e Mg) comparativamente as parcelas de textura argilosa. Já a parcela SC.B1 está situada sobre NEOSSOLO, sendo que o baixo intemperismo destes solos contribui para preservar a reserva de minerais primários ou secundários, fontes de nutriente como Ca. Esta parcela também apresentou valores relativamente baixos dos teores pseudototais de Ca do reservatório do solo.

Outra forma de estabelecer níveis críticos seria pela relação entre os níveis dos nutrientes no solo e a produtividade, o que não foi possível no presente

trabalho, apesar da grande variação de produtividade entre as parcelas estudadas. A ausência de correlações entre produtividade do *Pinus taeda* e os teores de nutrientes do solo, pode ser explicada, em parte, pelo fato das espécies florestais, pelo seu longo ciclo, adquirirem os nutrientes por outras formas além daquelas prontamente disponíveis no solo, como a entrada de nutrientes por deposição atmosférica (partículas em suspensão e precipitação pluvial) (JONSON; LINDBERG, 1992; CALDATO, 2011); intemperização das rochas (ALVES et al., 2013; JOHNSON; TURNER, 2019), decomposição da serapilheira (VIEIRA; SCHUMACHER, 2010; McELLIGOTT, 2017) e simbiose com microorganismos (CARVALHO et al., 2018).

6.5 CONCLUSÕES

- ✓ As parcelas que receberam fertilização apresentaram um aumento significativo nos teores de Ca e Mg do lenho, mas não apresentaram aumento dos teores de nutrientes nas acículas.
- ✓ Constatou-se ausência de correlação entre os teores de nutrientes das acículas e os teores de nutrientes do solo.
- ✓ Os teores de nutrientes do lenho apresentaram correlações positivas significativas com os teores de nutrientes do solo, e a metodologia de extração por ácido cítrico a 1% destacou-se por apresentar correlações para K, Ca e Mg.
- ✓ Apenas o P apresentou correlação positiva significativa entre os tecidos vegetais do lenho e das acículas do *Pinus taeda*.
- ✓ Não foi constatada correlação positiva significativa entre os nutrientes dos tecidos vegetais com a produtividade do *Pinus taeda*.

6.6 REFERÊNCIAS

ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L.; DOUGHERTY P.M.; JOHNSON K.H. Long term growth responses of loblolly pine to optimal nutrient and water resource availability. **Forest Ecology and Management**, 192:3–19. 2004.

ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L.; DOUGHERTY, P.M.; KRESS, L.W.; KING, J.S. Leaf-area and above- and belowground growth responses of loblolly pine to nutrient and water additions. **Forest Science**.44:317–328. 1998.

ALLEN, H.L.; WILL, R.E.; JACOBSON, M.A. Production efficiency and radiation use efficiency of four tree species receiving irrigation and fertilization. **Forest Science**, 51, n.6, p. 556-569. 2005.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**. Hamburg, v 113, n. 3/4, p. 407-427, 2013.

ALVES, M.J.F.; MELO, V.F.; REISSMANN, C.B.; KASEKER, J.F. Reserva mineral de potássio em Latossolo cultivado com *Pinus taeda* L. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 37:1599-1610, 2013.

BARROS FILHO, N. F.; SCHUMACHER, M. V.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F.; VALADARES, S.V. Tree Growth and Nutrient Dynamics in Pine Plantations in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 41, 2017.

BELLOTE, A.F.J.; SILVA, H.D. Técnicas de amostragem e avaliações nutricionais em plantios de Eucalyptus spp. In: GONÇALVEZ, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, p. 135-165. 2000.

BELLOTE, A.F.J.; TOMAZELLO FILHO, M.; DEDECEK, R.A. Influência dos nutrientes minerais e do solo sobre a produtividade, estrutura antômica e a densidade da madeira de *Pinus taeda*. **Documentos Embrapa Florestas**, Colombo, 94p. 2005.

CALDATO, S.L. **Ciclagem biogeoquímica dos nutrientes em uma plantação de *Pinus taeda* L. no nordeste argentino**. 106 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, 2011.

CALDEIRA, M.V.W.; SCHUMACHER, M.V.; PEREIRA, J.C.; DELLA-FLORA, J.B.; SANTOS, E.M. Concentração e redistribuição de nutrientes nas folhas e no folheto em um povoamento de *Acacia mearnsii* de Wild. no Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 19-24, 1999.

CARVALHO, A. M. X.; VALE, H. M. M.; FERREIRA, E. M.; CORDERO, A. F. P.; BARROS, N. F.; COSTA, M. D. Atividade microbiana de solo e serapilheira em áreas povoadas com *Pinus elliottii* e *Terminalia ivorensis*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32(spe), 2709-2716, 2008.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil/Secretaria de geologia, mineração e transformação mineral/Ministério de Minas e Energia, Mapa Geológico de Santa Catarina. Escala 1:500.000. 2014.

DONHA, C. G. **Dinâmica de crescimento e estoque de biomassa, carbono e nutrientes em espécies arbóreas da floresta atlântica no sul do Brasil**. 225 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

FERREIRA, C. A.; SILVA, H. D.; REISSMAN, C. B.; BELLOTE, A.F.J.; MARQUES R. **Nutrição de *Pinus* no Sul do Brasil diagnósticos e prioridades de pesquisa**. Documentos/Embrapa Florestas, Colombo, 23p. 2001.

FOX, T.R.; ALLEN, H.L.; ALBAUGH, T.J.; RUBHLAR, R.; CARLSON, C.A. Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the southern United States. **Southern Journal Applied Forestry**, 31(1):5–11. 2007.

HAMMER, Ø.; HARPER, D.A.T.; RYAN, P.D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. **Palaeontologia Electronica** 4: 1–9. 2001.

JOHNSON, D.W.; LINDBERG, S.E. **Atmospheric Deposition and Forest Nutrient Cycling. A Synthesis of Integrated Forest Study**. Springer-Verlag Ann Arbor, MI, pp. 707. 1992.

JOHNSON, D.W.; TURNER, J. Nutrient cycling in forests: a historical look and newer developments. **Forest Ecology Management**, 444:344-373, 2019.

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

LANDSBERG, J.J.; GOWER, S.T. **Application of physiological ecology to forest management**. Academic Press, San Diego, CA. 354 p. 1997.

LASO GARICOITIS, L.S. **Estado nutricional e fatores do solo limitantes do crescimento de *Pinus taeda* L. em Telêmaco Borba**. 128 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1990.

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**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 487-497, 2011.

LÚCIO, A.D.C.; ROSSATO, R.A.; SCHUMACHER, M.V.; FORTES, F.O.; STORCK, L.; WITSCHORECK, R. Limites de precaução e de controle em análises nutricionais de espécies florestais. **Revista Árvore**, 34(3), 529-537. 2010.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic. 889p, 2002.

McELGOTT, K.M. **Soil Respiration and Decomposition Dynamics of Loblolly Pine (*Pinus taeda*L.) Plantations in the Virginia Piedmont**. Dissertation. 135p. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia 2017.

MINEROPAR. Mapa Geológico do Estado do Paraná: unidades estratigráficas. Escala: 1:650.000. 2006.

PENNINCKX, V.; GLINEUR, S.; GRUBER, W.; HERBAUTS, J; MEERTS, P. Radial variations in wood mineral element concentrations: a comparison of beech and pedunculate oak from the Belgian Ardennes. **Annals of Forest Science** 53(3): 253-260. 2001.

PIATEK, K.B.; ALLEN, H.L. Site preparation effects on foliar N and P use, retranslocation, and transfer to litter in 15-year-old *Pinus taeda*. **Forestry Ecology Management**, Amsterdam, v. 129, p. 143-152, 2000.

REISSMANN, C.B.; WISNIEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de *Pinus*. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, p. 135-165. 2000.

REISSMANN, C.B.; ZOTTL, H.W. Problemas nutricionais em povoamentos de *Pinus taeda* em áreas de arenito da formação Rio Bonito – Grupo Guatá. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, Curitiba, v. 9, p. 75-80, 1987.

RODRIGUEZ, D.R.O.; DE CARVALHO, H.W.P.; TOMAZELLO FILHO, M. Nutrient concentrations of 17- year-old *Pinus taeda* annual tree-rings analyzed by X-ray fluorescence microanalysis. **Dendrochronologia**. v. 52, 67-79. 2018.

SAMUELSON, L.J.; PELL, C.J.; STOKES, T.A.; BARTKOWIAK, S.M.; AKERS, M.K.; KANE, M.; MARKEWITZ, D.; MCGUIRE, M.A.; TESKEY, R.O. Two-year throughfall and fertilization effects on leaf physiology and growth of loblolly pine in the Georgia Piedmont **Forest Ecol Manag** ; 330: 29-37, 2014.

SCHUMACHER, M.V.; VIERA, M.; WITSCHORECK, R. Produção de serapilheira e transferência de nutrientes em área de segunda rotação com floresta de *Pinus taeda* L. no município de Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 4, p. 471- 480, 2008.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A., et al. **Análise de solos, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: UFRG, Departamento de Solos/Faculdade de Agronomia, Boletim Técnico, 5, 174p. 1995.

TURNER, J.; LAMBERT, M.J. Analysis of nutrient use efficiency (NUE) in *Eucalyptus pilularis* forests. **Aust. J. Bot.** 62, 558–569, 2014.

VALERI, S.V. **Exportação de biomassa e nutrientes de povoamentos de *Pinus taeda* L. desbastados em diferentes idades**. 164 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1988.

VAN DEN DRIESSCHE, R. Prediction of mineral status of trees by foliar analysis. **The Botanical Review**, New York, v.40, p.347-394, 1984.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M.V. Concentração e retranslocação de nutrientes em acículas de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 4, 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**, Viçosa, v.34, n.1, p.85-94, 2010.

VOGEL, H. L. M.; SCHUMACHER, M. V.; NEVES, J. C.L. Avaliação nutricional e índices DRIS em um povoamento de *Pinus taeda* L. submetido à adubação NPK. **Ecologia e Nutrição Florestal**, Santa Maria, v.6, n.3, p.59-70, 2018.

WINAGRASKI, E. **Dinâmica de ectomicorrizas em um plantio adulto de *Pinus taeda* submetido a adubação e calagem no município de Jaguariaiva, PR**. 70 f. Dissertação de Mestrado. Universidade federal do Paraná, Curitiba, 2014.

WISNIEWSKI, C.; REISSMANN, C.B. Deposição de serapilheira e de nutrientes em plantios de *Pinus taeda* L. na região de ponta Grossa–PR. **Arq. Biol. Tecnol.** 1996.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- ✓ Os métodos de análise química do solo não foram suficientes para caracterizar as fontes de nutrientes para o crescimento e nutrição do *Pinus taeda*, o que indica a necessidade da avaliação dos fluxos de nutrientes associados a ciclagem biogeoquímica.
- ✓ Estudos envolvendo as relações entre a dinâmica da serapilheira, atributos químicos do solo, atividade microbológica do solo e a produtividade e nutrição florestal podem esclarecer sobre a forma como o *Pinus* utiliza os nutrientes.
- ✓ A análise da produtividade florestal em função do nutriente de forma isolada, sem considerar a interação entre os nutrientes nos tecidos vegetais, nem sempre é eficiente para caracterizar o estado nutricional das árvores. Neste sentido, ferramentas de análise nutricional como o CND (Diagnose da Composição Nutricional) ou DRIS (Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação) podem complementar as análises realizadas neste estudo, fornecendo respaldo sobre a correlação com a produtividade do *Pinus taeda* e a orientação sobre práticas de fertilização.

8 REFERÊNCIAS

ABRÃO, S.F.; DA ROSA, S.F.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SECCO, D.; EBLING, A.A. Alterações químicas de um CAMBISSOLO HÚMICO causadas por florestamento com *Pinus taeda* em área de campo natural. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 45, n. 3, p. 455 2015.

ADAM, W.M. **Composição química da serapilheira e raízes finas de *Pinus taeda* sob fertilização e calagem**. 30 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L.; DOUGHERTY P.M.; JOHNSEN K.H. Long term growth responses of loblolly pine to optimal nutrient and water resource availability. **Forest Ecology and Management**, 192:3–19. 2004.

ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L.; DOUGHERTY, P.M.; KRESS, L.; KING, J. Leaf area and above and belowground growth responses of loblolly pine to nutrient and water additions. **Forest Science**, Bethesda, v. 44, n 2, p317-328, 1998.

ALBAUGH, T. J.; ALLEN, H. L.; FOX, T. R. Nutrient use and uptake in *Pinus taeda*. **Tree physiology**, v. 28, n. 7, p. 1083-1098, 2008.

ALBAUGH, T.J.; FOX, T.R.; RUBILAR, R.A.; COOK, R.L.; AMATEIS, BURKHART, H.E. Post thinning density and fertilization affect *Pinus taeda* stand and individual tree growth. **Forest Ecology Management**.396:207–216. 2017.

ALLEN, H. L.; ALBAUGH, T. J. Ecophysiological basis for plantation production: A loblolly pine case study. **Bosque**, Valdivia, v. 20, n. 1, p 3-8, 1999.

ALLEN, H.L.; WILL, R.E.; JACOBSON, M.A. Production efficiency and radiation use efficiency of four tree species receiving irrigation and fertilization. **Forest Science**, 51, n.6, p. 556-569. 2005.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**. Hamburg, v 113, n. 3/4, p. 407-427,2013.

ALVES, M.J.F. **Reserva mineral de potássio em LATOSSOLO cultivado com *Pinus taeda* L.** 29 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

ALVES, M.J.F.; MELO, V.F.; REISSMANN, C.B.; KASEKER, J.F. Reserva mineral de potássio em Latossolo cultivado com *Pinus taeda* L. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 37:1599-1610, 2013.

AMARAL, F.H.C.; FURTINI NETO, A.E.; CURI, N.; INDA, A.V.; ARAÚJO, E.F. Produtividade de *Eucalyptus grandis* e sua relação com a cinética de liberação de macronutrientes. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 979-991, 2015.

ANDRADE, F.V.; MENDONÇA, E.S.; ALVAREZ, V.H.; NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em LATOSSOLOS e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27:1003-1011, 2003.

BALDOCK, J.A.; BROOS, K. Soil Organic Matter. In: HUANG, P.M., LIN, Y., SUMNER, M.E. (Eds). **Handbook of soil sciences**. Properties and process. Second ed., Taylor & Francis Group, Boca Raton. 11: p. 1- 52, 2012.

BARROS FILHO, N. F.; SCHUMACHER, M. V.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F.; VALADARES, S.V. Tree Growth and Nutrient Dynamics in Pine Plantations in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 41, e0160400. 04, 2017.

BATISTA, A.H.; MOTTA, A.C.V.; REISSMANN, C.B.; SCHNEIDER, T.; MARTINS, I.L.; HASHIMOTO, M. Liming and fertilisation in *Pinus taeda* plantations with severe nutrient deficiency in savanna soils. **Acta Scientiarum. Agronomy** (UEM). 1, 117, 2015.

BELLOTE, A.F.J.; SILVA, H.D. Técnicas de amostragem e avaliações nutricionais em plantios de *Eucalyptus* spp. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, p. 135-165. 2000.

BELLOTE, A.F.J.; SILVA, H.D.; FERREIRA, C.A.; ANDRADE, G.C. Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais. **Boletim de Pesquisa Florestal/Embrapa Florestas**, Colombo, 37; 99-106, 1998.

BELLOTE, A.F.J.; TOMAZELLO FILHO, M.; DEDECEK, R.A. Influência dos nutrientes minerais e do solo sobre a produtividade, estrutura anatômica e a densidade da madeira de *Pinus taeda*. **Documentos/ Embrapa Florestas**, Colombo, 94p. 2005.

BOCKHEIM, J.G.; GENNADIYEV, A.N. The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base. **Geoderma**, v. 95, p.53-72, 2000.

BOCKHEIM, J.G.; GENNADIEYEV, A.N.; HARTEMINK, A.E.; BREVIK, E.C. Soil-formation factors and Soil Taxonomy. **Geoderma**, v. 226-227, p. 231-237, 2014.

BOGNOLA I.A.; DEDECEK R.A.; LAVORANTI O.J.; HIGA A.R. Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de *Pinus taeda*. **Pesquisa Florestal Brasileira/ Embrapa Florestas**, Colombo, 30; 37- 49, 2010.

BORDERS, B.E.; WILL, R.E.; MARKEWITZ, D.; CLARK, A.; HENDRICK, R.; TESKEY, R.O.; ZHANG, Y. Effect of complete competition control and annual fertilization on stem growth and canopy relations for a chronosequence of loblolly pine plantations in the lower coastal plain of Georgia. **Forest Ecology and Management**, 192, pp. 21-3, 2004.

BRAIDA, J.A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M. **Matéria orgânica e seu efeito na física do solo**. Tópicos Ciência do solo, 7:221-278, 2011.

CALDATO, S.L. **Ciclagem biogeoquímica dos nutrientes em uma plantação de *Pinus taeda* L. no nordeste argentino**. 106 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, 2011.

CALDEIRA, M.V.W.; SCHUMACHER, M.V.; PEREIRA, J.C.; DELLA-FLORA, J.B.; SANTOS, E.M. Concentração e redistribuição de nutrientes nas folhas e no folheto em um povoamento de *Acacia mearnsii* de Wild. no Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 19-24, 1999.

CALVARUSO, C.; TURPAULT, M.P.; LECLERC, E.; RANGER, J.; GARBAYE, J.; UROZ, S.; FREY-KLETT, P. Influence of Forest Trees on the Distribution of Mineral Weathering-Associated Bacterial Communities of the *Scleroderma citrinum* Mycorrhizosphere . **Applied and Environmental Microbiology**; 76(14): 4780–4787. 2010.

CARTER, M.C.; FOSTER, C.D. Milestones and millstones: A retrospective of 50 years of research to improve productivity in loblolly pine plantations. *For. Ecol. Manag.* 227:137–144, 2006.

CARVALHO, A. M. X.; VALE, H. M. M.; FERREIRA, E. M.; CORDERO, A. F. P.; BARROS, N. F.; COSTA, M. D. Atividade microbiana de solo e serapilheira em áreas povoadas com *Pinus elliottii* e *Terminalia ivorensis*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32(spe), 2709-2716, 2008.

CASTRO, P.P.; CURTI, N.; FURTINI NETO, A. E.; RESENDE, A. V.; GUILHERME, L.R.G.; MENEZES, M. D.; ARAÚJO, E. F.; FREITAS, D. A. F.; MELLO, C. R.; SILVA, S. H. G. Química e mineralogia de solos cultivados com Eucalipto (*Eucalyptus sp.*). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 88, p. 645-657, 2010.

CHAVES, E.; PEDRON, F. A.; MELO, V. F.; DALMOLIN, R. Reserva mineral de K por diferentes métodos em ARGISSOLOS subtropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. vol. 39, n.4, 2015.

CHUN, L.; HUI-YI, H. Tree-ring element analysis of Korean pine (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) and Mongolian oak (*Quercus mongolica* Fisch. ex Turcz.) from Changbai Mountain, north-east China. **Trees**, 6:103-108. 1992

CORREA, R. S.; BELLOTE, A. F. J. Soil attributes and biomass yield from *Pinus caribaea* var. *Hondurensis*. **CERNE**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 181-187, 2011.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil/ Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral/Ministério de Minas e Energia. **Mapa Geológico de Santa Catarina. (escala 1:500.000)**. 2014.

CQFS-PR - Comissão de Química e Fertilidade do Solo. **Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná**. 2ª edição. SBCS. 289 p. 2019.

CUTTER, B.E.; GUYETTE, R. P. Anatomical, Chemical, and Ecological Factors Affecting Tree Species Choice in Dendrochemistry Studies. **Journal of Environmental Quality**, vol 22, num 3, pp 611-619, 1993.

DEDECEK, R.A.; FIER, I.S.N; SPELTZ, R; LIMA, L.C. de S. Influência do sítio no desenvolvimento do *Pinus taeda* aos 22 anos: 1. características físico-hídricas e químicas do solo. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, p. 507-516. 2008.

DICK, D.P.; NOVOTNY, H.E.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Química da matéria orgânica do solo. In: Melo V.F., Alleoni, L.R.F. (eds). **Química e Mineralogia do Solo**. Parte II, cap XI, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, 685p. 2009.

DICK, D.P.; SILVA, L.B.; INDA, A.V.; KNICKER, H. Estudo comparativo da matéria orgânica de diferentes classes de solos de altitude do sul do Brasil por

técnicas convencionais e espectroscópicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.32, n.6, p.2289-2296, 2008.

DONHA, C.G. **Dinâmica de crescimento e estoque de biomassa, carbono e nutrientes em espécies arbóreas da floresta atlântica no sul do Brasil**. 225 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 225 p. 2011.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. -Brasília, DF. 356 p. 2018.

FAUSTINO, L.I.; BUFLE, 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.

FERREIRA, C.A.; SILVA, H.D.; REISSMAN, C. B.; BELLOTE, A.F.J.; MARQUES R. **Nutrição de *Pinus* no Sul do Brasil diagnósticos e prioridades de pesquisa**. Documentos/Embrapa Florestas, Colombo, 23p. 2001.

FICK, S.E.; R.J. HIJMANS. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology** 37 (12): 4302-4315. 2017.

FOTH, H.D. **Fundamentals of soil science**. 8. ed. New York: John Wiley, p. 250-270, 1990.

FOX, T.R.; ALLEN, H.L.; ALBAUGH, T.J.; RUBHLAR, R.; CARLSON, C.A. Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the southern United States. **Southern Journal Applied Forestry**, 31(1):5–11. 2007.

FOX, T.R.; JOKELA, E.J.; ALLEN, H.L. The development of pine plantation silviculture in the southern United States, **Journal of Forestry** ,105, 337–347, 2007.

FRANCHINI, J.C.; HOFFMANN-CAMPO, C.B.; TORRES, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, A. Organic composition of green manure during growth and its effect on cation mobilization in an acid Oxisol. **Comm. Soil Sci. Plant Anal.**,34:2045-2058, 2003.

FRANCHINI, J.C.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; MALAVOLTA, E. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. **Pesq. Agropec. Bras.**, 34:2267-2276, 1999.

GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S.; SAGGIN, A. Quantificação do fósforo disponível por extrações sucessivas com diferentes extratores em latossolo vermelho distroférrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.4, p.1023-1029, 2002.

GATIBONI, L.C., DA SILVA, W.C., MUMBACH, G.L.; SCHMITT, D.E.; IOCHIMS, D.A.; STAHL, J.; VARGAS, C.O. Use of exchangeable and nonexchangeable forms of calcium, magnesium, and potassium in soils without fertilization after successive cultivations with *Pinus taeda* in southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, 20:665–674. 2020.

GATIBONI, L.C.; VARGAS, C.O.; ALBUQUERQUE, J.A.; ALMEIDA, J.A.; STAHL, J.; CHAVES, D.M.; BRUNETTO, G.; DALL'ORSOLETTA, D.J.; RAUBER, L.P. Phosphorus fractions in soil after successive crops of *Pinus taeda* L. without fertilization. **Ciência Rural** 47:1–8. 2017.

GIACHINI, A.J.; SOUZA, L.A.B.; OLIVEIRA, V.L. Species richness and seasonal abundance of ectomycorrhizal fungi in plantations of *Eucalyptus dunnii* and *Pinus taeda* in southern Brazil. **Mycorrhiza** 14:375–381. 2004.

GIANINAZZI–PEARSON, V. Plant cell responses to arbuscular mycorrhizal fungi: getting to the roots of the symbiosis. **The Plant Cell**, 8:1871–1883, 1996.

GEE, G.W.; OR, D. Particle size analysis. In: DANE, J.H. & TOPP, G.C. **Methods of soil analysis**. Physical methods. Madison, Soil Science Society of America, Part 4. p.255-293, 2002.

GOMES, F.S.; MENEGOL, O.F.; DEMATTÊ, J.A.M. Soil attributes related to Eucalypt and Pine plantations productivity in the South of Brazil. **Journal of Sustainable Forestry**, New Haven, v. 24, n.4, p. 61-82, 2007.

GONÇALVES, J. L. M.; MELLO, S. L. M. O sistema radicular das árvores. In: **Nutrição e fertilização de florestas**. Piracicaba: IPEF. p. 221-267, 2005.

GUPPY, C.N.; MENZIES, N.W.; MOODY, P.W.; BLAMEY, F.P.C. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: A review. **Austr. J. Soil Res.**, 43:189-202, 2005.

HAMMER, Ø.; HARPER, D.A.T.; RYAN, P.D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica* 4: 1–9. 2001.

HASHIMOTO, M.O. **Avaliação de diferentes técnicas de extração de nutrientes do solo e de plantas de *Pinus taeda* L.** 64 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

HRISTOVSKI, S.; MELOVSKI, L. Radial patterns of 13 elements in the tree rings of beech trees from Mavrovo National Park, Fyrom **Arch. Biol. Sci.**, Belgrade, 62 (2), 351-361, 2010.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Anuário 2019**. 80 p.

IBAÑEZ, C.; NUNEZ, P.; PEZZUTTI, R.; RODRIGUEZ; F. Soil ripping and phosphorus fertilization effects on *Pinus taeda* initial growth in red soils of Northeast Corrientes Province, Argentina. **Bosque** (Valdivia), vol.25, n.2, pp.69-76, 2004.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual técnico de pedologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015.

ILACO, B.V. **Agricultural Compendium: for rural development in the tropics and subtropics**. ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY, Amsterdam, p.102-135, 1981.

JENNY, H. **Factors of soil formation**. New York: Dover Publications, 281p. 1941.

JOHNSON, D.W.; LINDBERG, S.E. **Atmospheric Deposition and Forest Nutrient Cycling. A Synthesis of Integrated Forest Study**. Springer-Verlag Ann Arbor, MI, pp. 707. 1992.

JOHNSON, D.W.; TURNER, J. Nutrient cycling in forests: a historical look and newer developments. **Forest Ecology Management**, 444:344-373, 2019.

KAISER, K.; GUGGENBERGER, G. Sorptive stabilization of organic matter by microporous goethite: Sorption into small pores vs. surface complexation. **European Journal Soil Science**, 58:45-59, 2007.

KÄMPF, N.; CURI N. Formação e evolução do solo (pedogênese). In: Ker, J.C; Curi N.; Schaefer C.E.G.R.; Vidal-Torrado, P. (Eds.). **Pedologia: fundamentos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p 208-291, 2012.

KASEKER, J. F. **Composição química de acículas, serapilheira, solos rizosférico e não rizosférico e variabilidade espacial em ensaio de omissão**

de nutrientes em *Pinus taeda*. 95 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

KING, J. S.; ALBAUGH, T. J.; ALLEN, H. L.; KRESS, L. W. Stand-level allometry in *Pinus taeda* as affected by irrigation and fertilization. **Tree Physiol** 19:769–778, 1999.

KRONKA, F.J.N.; BERTOLANI, F.; HERRERA PONCE, R. **A cultura do Pinus no Brasil**. São Paulo, SBS, 160 p. 2005.

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

LANDSBERG, J.J.; GOWER, S.T. **Application of physiological ecology to forest management**. Academic Press, San Diego, CA. 354 p. 1997.

LASO GARICOITIS, L. S. **Estado nutricional e fatores do solo limitantes do crescimento de *Pinus taeda* L.** em Telêmaco Borba. 128 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1990.

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**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 487-497, 2011.

LOPES, V.G.; SCHUMACHER, M.V.; CALIL, F.N.; VIERA, M; WITSCHORECK, R. Quantificação de raízes finas em um povoamento de *Pinus taeda* L. e uma área de campo em Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 569-578, 2010.

LÚCIO, A. D. C.; ROSSATO, R. A.; SCHUMACHER, M. V.; FORTES, F. O.; STORCK, L.; WITSCHORECK, R. Limites de precaução e de controle em

análises nutricionais de espécies florestais. **Revista Árvore**, 34(3), 529-537. 2010.

MAEDA, S; BOGNOLA, I. A. Chemical properties of soil treated with waste from the pulp and paper industries. **Brazilian Journal of Forest Research**. 33, 74, 169, 2013.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic. 889p, 2002.

MARQUES, R.; MOTTA, A.C.V. Análise química do solo para fins de fertilidade. In: LIMA, R.M. (Org.). **Manual de diagnóstico da fertilidade e manejo dos solos agrícolas**. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, p.81-102. 2003.

McELLIGOTT, K. M. **Soil Respiration and Decomposition Dynamics of Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.) Plantations in the Virginia Piedmont**. Dissertation. 135p. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia 2017.

MELO, V.F.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M.; NOVAIS, R.F.; FONTES, M.P.F. Formas de potássio e de magnésio em solos do Rio Grande do Sul, e sua relação com o conteúdo na planta e com a produção em plantios de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**.19:165-71. 1995.

MELO, V.F.; CASTILHOS, R.M.V.; PINTO, L.F.S. Reserva mineral do solo. In: MELO, V.F.; ALLEONI, L.R.F. (Eds) **Química e Mineralogia do Solo**. SBCS, Viçosa, p. 252-321, 2009.

MENEGOL, O. **Índice de sítio e relação entre altura e teores nutricionais das acículas em povoamentos de *Pinus elliottii* var. *elliottii* no segundo planalto paranaense**. 74 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1991.

MINEROPAR – Serviço Geológico do Paraná. **Mapa Geológico do Estado do Paraná: unidades estratigráficas. (Escala: 1:650.000).** 2006.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo.** UFLA 2 ed. Lavras, 729 p., 2006.

MORO, L.; GATIBONI, L.C.; SIMONETE, M.A.; CASSOL, P.C.; CHAVES, D.M. Resposta de *Pinus taeda* com diferentes idades à adubação NPK no Planalto Sul Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 1181-1189, 2014.

MORO, L.; FERREIRA, C.A.; SILVA, H.D.; REISSMANN, C.B. Exportação de nutrientes em povoamentos de *Pinus taeda* L. Baseada em volume estimado pelo sistema SISPINUS. **Floresta**. 38:465-77. 2008.

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.** 117 f. Dissertação de Mestrado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/ Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

MUNHOZ, J. S. B. **Influência dos fatores edafoclimáticos na produtividade e na eficiência do uso dos recursos naturais do *Pinus taeda* L. sob distintos manejos no Sul do Brasil.** 142 f. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/ Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

OBURGER, E.; JONES, D. L.; WENZEL, W.W. Phosphorus saturation and pH differentially regulate the efficiency of organic acid anion-mediated P solubilization mechanisms in soil. **Plant Soil**, 341:363, 2011.

OBURGER, E.; KIRK, G.J.D.; WENZEL, W.W.; PUSCHENREITER, M.; JONES, D.L. Interactive effects of organic acids in the rhizosphere. **Soil Biology & Biochemistry**. Vol. 41, p. 449-457, 2009.

OLSSON, P.A.; JAKOBSEN, I.; WALLENDER, H. Foraging and resource allocation strategies of mycorrhizal fungi in a patchy environment. In: van der HEIJDEN, M.G.A.; SANDERS, I.R., eds. **Mycorrhizal ecology: ecological studies**. Berlin, Springer-Verlag, 2002. p.93-110.

PAIM, R.M. **Efeito do uso de lama de cal e cloreto de potássio no solo, estado nutricional e crescimento do *Pinus taeda* L., sobre LATOSSOLO**. 124 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

PALOMO, L.; CLAASSEN, N.; JONES, D.L. Differential mobilization of P in the maize rhizosphere by citric acid and potassium citrate. **Soil Biology & Biochemistry**. Vol. 38, p 683-692, 2006.

PAVINATO, P.S.; ROSOLEM, C.A. Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 911-920, 2008.

PENNINCKX, V.; GLINEUR, S.; GRUBER, W.; HERBAUTS, J; MEERTS, P. Radial variations in wood mineral element concentrations: a comparison of beech and pedunculate oak from the Belgian Ardennes. **Annals of Forest Science** 53(3): 253-260. 2001.

PETERSON, B.G.; CARL, P. PerformanceAnalytics: Econometric tools for performance and risk analysis R package version 1.4.3541, 2014. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=PerformanceAnalytics>>

PIATEK, K.B.; ALLEN, H.L. Site preparation effects on foliar N and P use, retranslocation, and transfer to litter in 15-year-old *Pinus taeda*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 129, p. 143-152, 2000.

R CORE TEAM, A language and environment for statistical computing v3.3. 2014.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba, Ceres/Potafos, 343p. 1991.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, O.C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas, Fundação Cargill, 170p. 1987.

REIS, G. S.; MIZUSAKI, A.M.; ROISENBERG, A.; RUBERT, R. R. Formação Serra Geral (Cretáceo da Bacia do Paraná): um análogo para os reservatórios ígneo-básicos da margem continental brasileira. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS **Pesquisas em Geociências**, 41 (2): 155-168, 2014.

REISSMANN, C.B.; WISNIEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de *Pinus*. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, p. 135-165. 2000.

REISSMANN, C.B.; ZOTTL, H.W. Problemas nutricionais em povoamentos de *Pinus taeda* em áreas de arenito da formação Rio Bonito – Grupo Guatá. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, Curitiba, v. 9, p. 75-80, 1987.

RESENDE, M.; CURI, N.; RESENDE, S.B.; CORRÊIA, G. F. **Pedologia: base para a distinção de ambientes**. Viçosa: NEPUT, 4a ed. 338p. 2002.

RIGATTO, P. A.; DEDECEK, R.A.; MATTOS, J.L.M. Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *Pinus taeda*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n.5, p. 701-709, 2005.

RIGUEIRO-RODRIGUEZ, A.; CASTRO, S.; M.R. MOSQUERA-LOSADA. Effects of dose and period of sewage sludge application on soil, tree and pasture components in a *Pinus radiata* D. Don silvopastoral system. **Agroforest Syst**, 79:237-247, 2010.

ROCHA, J.H.T.; DU TOIT, B.; GONÇALVES, J.L.M. Ca and Mg nutrition and its application in Eucalyptus and Pinus plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 442, n. January, p. 63–78, jun. 2019.

RODRIGUES, C.; BELLOTE, A.F.J; DEDECEK, R.A.; GOMES, F.S. Alteração na Nutrição e na produtividade de *Pinus taeda* L. provocadas pela aplicação de resíduo celulósico. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 51, p.131-143. 2005.

RODRIGUEZ, D.R.O.; DE CARVALHO, H.W.P.; TOMAZELLO FILHO, M. Nutrient concentrations of 17- year-old *Pinus taeda* annual tree-rings analyzed by X-ray fluorescence microanalysis. **Dendrochronologia**. v. 52, 67-79. 2018.

ROSSI, A.M.; RABENHORST, M.C. Pedogenesis and landscape relationships of a Holocene age barrier island. **Geoderma**.; 262:71- 84, 2016.

SAMPSON, D.A.; ALLEN, H.L. Regional influences of soil available water-holding capacity and climate, and leaf area index on simulated loblolly pine productivity. **Forest Ecology and Management**, 124, pp. 1-12, 1999.

SAMUELSON, L.J.; PELL, C.J.; STOKES, T.A.; BARTKOWIAK, S.M.; AKERS, M.K.; KANE, M.; MARKEWITZ, D.; MCGUIRE, M.A.; TESKEY, R.O. Two-year throughfall and fertilization effects on leaf physiology and growth of loblolly pine in the Georgia Piedmont **Forest Ecology and Management**; 330: 29-37, 2014.

SANCHEZ, F.G. Loblolly pine needle decomposition and nutrient dynamics as affected by irrigation, fertilization, and substrate quality. **Forest Ecology and Management**, 152, 85-96. 2001.

SANTOS, D.R.; GATIBONI L.C.; KAMINSKI J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**. 38:576-586. 2008.

SANTOS FILHO, A.; LASO, L.S.; REISSMANN, C.B. et al. Desenvolvimento do *Pinus taeda* L. em função das características dos solos em Telêmaco Borba/PR. *Agrárias*, 12, 1-2, 13-24. 1992.

SAWYER, N.A.; CHAMBERS, S.M.; CAIRNEY, J.W.G. Utilisation of inorganic and organic phosphorus sources by isolates of *Amanitamuscaria* and *Amanita* species native to temperate eastern Australia. **Australian Journal of Botany**, v.51, p.151-158, 2003.

SCHULTZ, R. P. **The ecology and culture of Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.)**. New Orleans: Agricultural Handbook 713. U. S. Department of Agriculture, Forest Service Washington, D. C., p. 20-28, 1997.

SCHUMACHER, M.V.; VIERA, M.; WITSCHORECK, R. Produção de serapilheira e transferência de nutrientes em área de segunda rotação com floresta de *Pinus taeda* L. no município de Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 4, p. 471-480, 2008.

SIMONSON, R.W. Outline of a generalized theory of soil genesis. **Soil Science Society Proceedings**. 23, 152-156, 1959.

SIXEL, R.M.M.; JUNIOR, J.C.A.; GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; ANDRADE, G.R.P.; AZEVEDO, A.C.; STAHL, J.; MOREIRA, A.M. Sustainability of wood productivity of *Pinus taeda* based on nutrient export and stocks in the biomass and in the soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39(5), 1416-1427, 2015.

SMITH, S.E.; JAKOBSEN I.; GRONLUND, M.; SMITH F.A. Roles of Arbuscular Mycorrhizas in Plant Phosphorus Nutrition: Interactions between Pathways of Phosphorus Uptake in Arbuscular Mycorrhizal Roots Have Important Implications for Understanding and Manipulating Plant Phosphorus Acquisition. **Plant Physiol.** 156:1050–1057, 2011.

SOIL SURVEY LABORATORY METHODS MANUAL. **Chemical analyses citric acid extractable phosphorus** (6S) Beckmann DU-7, UV-VISIBLE spectrophotometer (6S5), p. 337-341, 1996.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. 372p, 2014.

SOUCHIE, E.L.; ABOUD, A.C.S.; CAPRONI, A.L. Solubilizadores de fosfato in vitro por microrganismos rizosféricos de guandu. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 2, p. 53-60, 2007.

SOUZA, L.A.B.; SILVA FILHO, G.N.; OLIVEIRA, V.L. Eficiência de fungos ectomicorrízicos na absorção de fósforo e na promoção do crescimento de eucalipto. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 39, n. 4, p. 349-355, 2004.

STAPE, J.L., BINKLEY, D., RYAN, M.G., FONSECA, S.R.L., TAKAHASHI, E.N., SILVA, C.R., HAKAMADA, S.R., FERREIRA, J.M., LIMA, A.M., GAVA, J.L., LEITE, F.P., SILVA, G., ANDRADE, H., ALVES, J.M. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**. 259: 1674–1684, 2010.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A., et al. **Análise de solos, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: UFRG, Departamento de Solos/Faculdade de Agronomia, Boletim Técnico, 5, 174p. 1995.

TOMAZELLO FILHO, M.; KRÜGNER, T.L. Aspectos da associação micorrízica em *Pinus* spp. **Série Técnica do Instituto de Estudos Florestais**, Departamento de Silvicultura da ESALQ-USP, 3:1-32, 1982.

TURNER, J.; LAMBERT, M.J. Analysis of nutrient use efficiency (NUE) in *Eucalyptus pilularis* forests. **Aust. J. Bot.** 62, 558–569, 2014.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils and Oils – Method 3051A – SW – 846,2007. <https://www.epa.gov/sites/production/files/201512/documents/3051a.pdf>.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. Microwave Assisted Acid digestion of Sediments, Sludges, Soils and Oils – Method 3052 – SW – 846, 1996. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/3052.pdf>.

VALERI, S.V. **Exportação de biomassa e nutrientes de povoamentos de *Pinus taeda* L. desbastados em diferentes idades**. 164 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1988.

VAN DEN DRIESSCHE, R. Prediction of mineral status of trees by foliar analysis. **The Botanical Review**, New York, v.40, p.347-394, 1984.

VETTORAZZO, S.C. **Intensidade e local de amostragem para avaliação nutricional de povoamentos de *Pinus taeda* L.** 114 f. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/ Universidade de São Paulo, 1994.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M.V. Concentração e retranslocação de nutrientes em acículas de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 4, 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**, Viçosa, v.34, n.1, p.85-94, 2010.

VOGEL, H.L.M.; SCHUMACHER, M.V.; NEVES, J.C.L. Avaliação nutricional e índices DRIS em um povoamento de *Pinus taeda* L. submetido à adubação NPK **Ecologia e Nutrição Florestal**, Santa Maria-RS, v.6, n.3, p.59-70, 2018.

WILL, R.; FOX, T.; AKERS, M.; DOMEK, J.C.; GONZALEZ-BENECKE, C.; JOKELA, E.; KANE, M.; LAVINER, M.; LOKUTA, G.; MARKEWITZ, D.; et al. A range-wide experiment to investigate nutrient and soil moisture interactions in loblolly pine plantations. **Forests**, 6, 2014–2028, 2015.

WINAGRASKI, E. **Dinâmica de ectomicorrizas em um plantio adulto de *Pinus taeda* submetido a adubação e calagem no município de Jaguariaiva, PR.** 70 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

WISNIEWSKI, C.; REISSMANN, C.B. Deposição de serapilheira e de nutrientes em plantios de *Pinus taeda* L. na região de ponta Grossa–PR. **Arq. Biol. Tecnol**, 1996.

ZHAO, D.; KANE, M.; TESKEY, R.; FOX, T. R.; ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L. RUBILAR, R. Maximum response of loblolly pine plantations to silvicultural management in the southern United States. **Forest Ecology and Management** 375: 105–111, 2016.

APÊNDICE 1

RDA scores (productivity, soil A horizon and climatic variables)

	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 4
Response				
MAI	0,973404	0,229094	0,970572	0,240811
SI	0,229094	-0,9734	0,240811	-0,97057
Site				
PR.B2	-11,2324	1,36297	-3,83201	0,842196
PR.A2	-8,46647	-3,84179	-3,29993	-1,34015
SC.C2	-4,51582	1,1973	1,2155	-0,25142
SC.A2	-3,54232	-0,32004	-4,07514	-0,83808
SC.C3	-1,95626	0,361445	-0,32363	0,002178
PR.B1	-0,55328	-1,6712	1,76723	-0,44116
SC.B1	-0,87991	2,77214	1,20401	0,36595
PR.A3	0,380007	-0,83515	2,79879	2,02613
SC.B2	0,746263	2,84667	0,61408	0,415906
PR.A1	5,00663	-1,28725	1,24397	0,054947
SC.B3	5,14389	1,62156	-4,85	1,07547
SC.A1	6,02575	0,49359	4,87004	-0,64914
PR.B3	6,8619	-2,18612	1,65915	-0,47497
SC.C1	6,98205	-0,51413	1,00795	-0,78787
Explanatory				
depth	0,256272	0,07761		
Clay	0,544586	0,077893		
C	0,089169	0,097181		
P	-0,3776	0,082358		
SB	-0,13863	0,02712		
Tmax.	-0,1307	-0,22657		
Tmin.	-0,18794	-0,22542		
Precip.	0,259418	0,176884		

APÊNDICE 2

RDA scores (productivity, soil B horizon and climatic variables)

	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 4
Response				
MAI	0,990758	0,135638	0,924324	0,381609
SI	0,135638	-0,99076	0,381609	-0,92432
Site				
PR.B2	-11,4503	2,53961	-7,51311	0,641441
PR.A2	-9,19101	-2,90426	-0,07111	-1,22341
SC.A2	-3,95473	0,134058	-2,36782	-1,15605
SC.C3	-2,31113	0,66187	-1,31492	-0,19362
PR.B1	-1,10748	-1,4948	4,21829	0,044641
SC.B1	-1,01076	2,95948	0,553888	0,576026
PR.A3	-0,09903	-0,75114	0,509853	1,39008
SC.B2	1,40775	2,98779	2,14922	0,578023
PR.A1	4,46376	-1,64047	5,12819	0,550252
SC.B3	4,87658	1,24216	-2,07922	1,28023
SC.A1	5,64737	0,035557	0,714	-1,16123
PR.B3	6,22531	-2,71144	0,035262	-0,37384
SC.C1	6,50366	-1,05841	0,03748	-0,95255
Explanatory				
depth	-0,04212	-0,11191		
SB	-0,27967	0,047595		
Clay	0,473148	0,060174		
P	-0,14829	-0,03845		
C	0,111034	0,151476		
Tmax.	-0,20224	-0,21072		
Tmin.	-0,27816	-0,20092		
Precip.	0,341397	0,142765		

APÊNDICE 3

Localização, classe de solo e atributos físicos e químicos dos solos e produtividade das parcelas de estudo sob os tratamentos não fertilizado (NF) e fertilizado (F).

Município	Solo	parcela	trat.	prof. cm	pH	Al cmol _c dm ⁻³	Al+H dm ⁻³	m %	C	N	argila gkg ⁻¹	IMA m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹
Telêmaco Borba/PR	CXbd	PR.A3	NF	0 - 10	3,7	2,6	15,6	69,7	24,3	1,2	238	37,69
			F	10 - 20	3,8	1,7	12,2	57,0	13,0	0,8		42,28
		PR.A3f	NF	0 - 10	3,9	1,5	11,7	46,2	21,8	1,2		42,28
			F	10 - 20	3,9	1,6	10,2	61,4	13,5	0,8		42,28
Arapoti/PR	LVAd	PR.B1	NF	0 - 10	3,8	1,2	8,1	38,2	26,4	1,7	150	37,52
			F	10 - 20	3,9	1,0	7,8	35,1	18,9	1,3		44,63
		PR.B1f	NF	0 - 10	4,1	0,8	7,2	20,5	34,7	2,2		44,63
			F	10 - 20	3,9	1,1	6,1	38,4	22,6	1,6		44,63
Arapoti/PR	LVd	PR.B2	NF	0 - 10	3,4	2,7	12,4	61,0	29,8	2,0	300	26,33
			F	10 - 20	3,5	2,0	9,0	55,0	22,0	1,5		23,50
		PR.B2f	NF	0 - 10	3,6	1,8	10,1	30,8	26,4	1,7		23,50
			F	10 - 20	3,7	1,8	9,9	39,3	18,9	1,3		23,50
Curiúva/PR	LVd	PR.B3	NF	0 - 10	3,8	1,9	11,2	33,1	29,8	2,0	613	42,00
			F	10 - 20	3,8	1,6	12,8	35,6	20,9	1,5		42,00
		PR.B3f	NF	0 - 10	3,7	1,8	13,1	32,0	30,2	2,0		42,00
			F	10 - 20	3,7	2,0	9,8	36,6	27,0	1,8		42,00
Rio Negrinho/SC	CHd	SC.A1	NF	0 - 10	3,7	7,0	20,9	80,9	24,0	1,4	400	44,40
			F	10 - 20	3,7	6,3	21,5	92,3	10,6	0,7		45,40
		SC.A1f	NF	0 - 10	3,7	6,0	19,2	86,7	18,7	1,3		45,40
			F	10 - 20	3,7	7,0	19,0	90,9	15,1	1,2		45,40
Itaiópolis/SC	CHd	SC.A2	NF	0 - 10	3,4	4,5	17,2	85,4	47,5	2,6	688	34,30
			F	10 - 20	3,6	3,2	13,1	80,6	34,7	1,9		41,00
		SC.A2f	NF	0 - 10	3,6	4,5	16,1	66,1	29,2	1,5		41,00
			F	10 - 20	3,7	4,3	15,5	83,7	41,0	2,0		41,00
Lébon Régis/SC	RLh	SC.B1	NF	0 - 10	3,8	6,4	19,5	91,8	70,1	4,3	438	33,20
			F	10 - 20	3,9	6,1	19,5	93,1	59,3	3,4		32,09
		SC.B1f	NF	0 - 10	3,8	5,8	19,5	86,8	76,9	4,9		32,09
			F	10 - 20	3,9	5,8	19,0	89,5	61,7	3,5		32,09
Palmeira/SC	CHa	SC.C3	NF	0 - 10	3,5	8,7	22,0	92,5	36,1	2,2	550	37,45
			F	10 - 20	3,5	7,2	22,0	92,7	33,4	2,0		38,6
		SC.C3f	NF	0 - 10	3,9	4,4	14,2	60,3	41,0	2,0		38,6
			F	10 - 20	3,8	3,9	15,6	62,4	29,2	1,5		38,6

APÊNDICE 4

Teores de P, K, Ca e Mg extraídos por diferentes metodologias de análise de solo

parcela	prof.	cm	mg kg ⁻¹											
			Mehlich 1		KCl		Ácido cítrico				Total		Pseudototal	
			P	K	Ca	Mg	P	K	Ca	Mg	P	K	Ca	Mg
SC.A1	N	0-10	1,8	22,3	16,4	24,5	45,5	60,1	18,1	90,8	105,1	416,3	39,5	637,4
		10-20	1,5	15,0	13,2	23,3	25,6	35,1	5,8	6,7	110,1	734,5	23,0	539,8
SC.A1f	F	0-10	6,8	21,3	24,4	31,5	22,6	53,7	19,2	22,4	124,7	908,5	85,9	713,3
		10-20	2,7	16,3	39,1	44,5	19,1	46,4	14,7	20,6	158,0	982,4	45,7	459,2
SC.A2	N	0-10	2,2	17,0	10,2	22,2	5,9	11,8	2,9	4,2	463,6	6633,1	17,5	321,0
		10-20	1,2	13,3	13,0	20,2	6,5	11,5	3,7	4,7	346,0	5896,0	24,9	378,1
SC.A2f	F	0-10	22,2	27,3	116,0	68,3	36,1	33,2	174,8	126,6	235,5	5246,0	239,2	709,1
		10-20	3,5	15,0	16,8	39,9	7,7	13,1	4,8	7,9	324,1	6997,8	30,9	526,0
PR.B1	N	0-10	17,3	60,7	66,1	24,9	11,2	22,9	62,6	10,3	680,1	777,3	87,5	130,8
		10-20	11,0	54,0	78,2	23,7	10,8	17,4	60,6	7,3	596,0	524,3	103,1	122,5
PR.B1f	F	0-10	6,8	57,7	165,5	58,0	12,6	27,6	201,2	55,9	409,3	3998,3	256,0	539,5
		10-20	4,0	38,7	116,4	39,9	4,3	23,5	43,2	17,6	492,0	548,6	176,5	250,4
PR.B2	N	0-10	5,1	22,3	59,7	24,1	6,7	22,1	18,5	7,3	391,1	1361,6	112,8	154,3
		10-20	5,5	19,0	20,8	17,9	2,9	12,1	5,0	3,6	172,8	2618,3	27,5	103,6
PR.B2f	F	0-10	8,1	28,0	107,6	44,9	10,5	31,3	126,6	46,3	105,2	2597,5	239,2	187,4
		10-20	5,0	18,0	67,7	35,6	2,6	15,8	22,5	10,9	128,9	2242,4	74,7	140,5
PR.B3	N	0-10	9,4	62,7	39,9	18,3	4,3	31,6	112,7	15,6	130,1	1529,5	330,8	274,9
		10-20	2,0	28,0	186,4	37,7	1,6	23,1	107,9	16,4	125,0	639,5	194,7	212,2
PR.B3f	F	0-10	3,5	41,0	226,5	58,9	19,3	75,3	488,5	99,7	113,0	422,4	889,8	361,5
		10-20	1,2	25,3	176,2	67,1	2,7	26,2	122,3	28,2	109,2	328,9	204,1	229,2
PR.A3	N	0-10	2,7	15,0	16,9	30,1	5,5	10,7	2,0	4,4	133,4	320,4	17,1	186,5
		10-20	1,5	10,3	16,4	21,6	2,0	4,3	0,8	2,7	113,2	350,0	18,4	155,2
PR.A3f	F	0-10	2,3	22,0	83,4	67,5	5,3	20,1	163,0	69,6	120,4	529,8	155,3	265,2
		10-20	1,4	14,3	56,7	56,2	1,7	10,0	40,0	26,4	116,2	537,7	56,6	244,5
SC.B1	N	0-10	1,7	42,7	27,7	23,9	42,2	41,4	17,6	12,7	306,8	1103,9	75,5	742,6
		10-20	2,5	38,7	23,0	20,4	37,4	40,6	10,5	10,0	353,2	1119,5	56,4	661,3
SC.B1f	F	0-10	4,9	52,7	40,3	32,9	67,5	62,4	81,9	37,0	516,0	719,7	171,7	753,7
		10-20	2,8	38,0	35,3	27,2	49,5	33,9	30,7	20,7	430,1	739,2	109,5	760,4
SC.C3	N	0-10	3,6	61,7	40,3	36,6	19,7	61,9	45,8	14,0	235,4	4597,8	78,9	1959,9
		10-20	2,6	59,3	35,1	26,5	20,0	48,8	27,7	9,6	233,8	4519,9	63,7	2116,8
SC.C3f	F	0-10	6,2	101,7	191,8	97,1	29,1	110,7	345,3	80,8	243,0	4604,1	455,1	1436,6
		10-20	4,3	82,0	97,0	55,0	16,4	71,6	129,8	35,4	234,9	4750,3	189,5	1612,7

NF: não fertilizado; F: fertilizado