

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

Taciara Zborowski Horst

**VARIAÇÃO DE PARÂMETROS DENDROMÉTRICOS DE *Pinus taeda* L. E A
DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO POR TÉCNICAS
DE MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS**

Santa Maria, RS, Brasil

2017

Taciara Zborowski Horst

**VARIAÇÃO DE PARÂMETROS DENDROMÉTRICOS DE *Pinus taeda* L. E A
DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO POR TÉCNICAS DE
MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra** em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Ricardo Simão Diniz Dalmolin

Santa Maria, RS, Brasil
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática
da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Horst, Taciara Zborowski
VARIAÇÃO DE PARÂMETROS DENDROMÉTRICOS DE *Pinus taeda*
L. E A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO POR
TÉCNICAS DE MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS / Taciara
Zborowski Horst.- 2017.
122 p.; 30 cm

Orientador: Ricardo Simão Diniz Dalmolin
Coorientador: Alexandre ten Caten
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2017

1. Mapeamento digital de solos 2. Solo florestal I.
Dalmolin, Ricardo Simão Diniz II. ten Caten, Alexandre
III. Titulo.

Taciara Zborowski Horst

**VARIAÇÃO DE PARÂMETROS DENDROMÉTRICOS DE *Pinus taeda* L. E A
DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO POR TÉCNICAS DE
MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra** em Ciência do Solo.

Aprovado em 27 de julho de 2017:

Ricardo Simão Diniz Dalmolin, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Alexandre ten Caten, Dr. (UFSC)
(Coorientador)

Fábricio de Araújo Pedron, Dr. (UFSM)

Elpídio Inácio Fernandes Filho, Dr. (UFV)
(via web)

Santa Maria, RS, Brasil
2017

AGRADECIMENTOS

Agradecer não é uma tarefa fácil. Não pelo ato de agradecer, em si, mas por achar que todos que ajudaram a construir essa dissertação nunca serão devidamente agradecidos.

Ao meu orientador professor Ricardo Simão Diniz Dalmolin.

Ao meu Coorientador professor Alexandre ten Caten.

À Empresa Florestal Gateados Ltda.

Ao grupo de Pedologia da Universidade Federal de Santa Maria.

Aos colegas Jean Michel Moura Bueno, Luciano Campos Cancian, Estelita Saldanha Penteado, Nícolas Augusto Rosin, Diego José Gris, Luíza Martiça Kreimeier, Jéssica Rafaela da Costa e Ismael Luís Spohr Backes.

Aos professores membros da banca Fabrício Araújo Pedron e Elpídio Inácio Fernandes Filho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria, pela oportunidade de aprimoramento técnico-científico.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

Muito obrigada!

RESUMO

VARIAÇÃO DE PARÂMETROS DENDROMÉTRICOS DE *Pinus taeda* L. E A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO POR TÉCNICAS DE MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS

O estudo das relações entre o potencial produtivo e as condições oferecidas ao desenvolvimento de povoamentos florestais é fundamental para o manejo adequado da floresta, visando à máxima produtividade sustentável. Considerando a necessidade de utilizar informações espaciais de solo em prol do sistema produtivo florestal, o objetivo geral desta dissertação foi avaliar a relação entre variáveis dendrométricas, topográficas e pedológicas e realizar a predição espacial das variáveis pedológicas mais correlacionadas com a variação dos parâmetros dendrométricos de *Pinus taeda* L. O trabalho foi desenvolvido em uma área de 108 ha de pinus com 29 anos, no município de Campo Belo do Sul, Santa Catarina. Foram amostrados 11 perfis e 126 pontos e definidos os conjuntos de variáveis pedológicas, topográficas e dendrométricas. A partir da análise de correlação de Spearman foram selecionadas as variáveis com maior correlação com os parâmetros dendrométricos de pinus. Para cada variável selecionada foram construídas funções de predição por regressão linear múltipla e random forest. Os melhores modelos foram utilizados para predição espacial. As características físicas e morfológicas do solo prevalecem sobre as químicas na correlação com a dendrometria. A profundidade do solum, a espessura do horizonte superficial, a elevação e a distância vertical da rede de drenagem foram as variáveis mais relacionadas com os parâmetros dendrométricos. O melhor resultado de predição foi obtido a partir do modelo random forest que apresentou $R^2= 0,25$ e RMSE de 30,23 cm na predição da profundidade do solum e $R^2= 0,15$ e RMSE= 11,75 cm na predição da espessura do horizonte A. Os resultados encontrados no presente estudo confirmaram a hipótese que a produtividade de pinus é influenciada pelas variáveis pedológicas, e, que estas informações são passíveis de serem preditas utilizando o Mapeamento Digital de Solos.

Palavras-chave: solo florestal, silvicultura, mapeamento digital de solos.

ABSTRACT

VARIATION OF DENDROMETRIC PARAMETERS OF PINUS TAEDA L. AND THE SPACE DISTRIBUTION OF SOIL ATTRIBUTES BY DIGITAL SOIL MAPPING TECHNIQUES

The study of the relationship between yield potential and the conditions offered to the development of forest stands is fundamental for the adequate management of the forest, aiming at maximum sustainable yield. Considering the need of using soil spatial information in favor of the forest production system, the overall objective of this dissertation was to evaluate the relationship between dendrometric, topographic and pedological variables and to perform the spatial prediction of the pedological variables correlated with the variation of the dendrometric parameters of *Pinus taeda* L. The study was conducted in an area of 109 ha of pinus at 29 years, in the city of Campo Belo do Sul, Santa Catarina. Samples were taken from 11 profiles and 126 points and groups were defined for pedologic, topographic and dendrometric variables. Through the analysis of Spearman correlation, variables with higher correlation to the dendrometric parameters of pinus were selected. For each selected variable, prediction functions were built using multiple linear regression and random forest. The best models were used for spatial prediction. Physical and morphological properties of soil prevail over chemical ones in the correlation with dendrometry. Soil depth, thickness of superficial horizon, elevation and vertical distance to channel network were the variables most related to the dendrometric parameters. The best prediction result was obtained with the random forest model, which showed $R^2= 0.25$ and RMSE of 30.23 cm in the prediction of depth of solum, and $R^2= 0.15$ and RMSE=11.75 cm in the prediction of thickness of superficial horizon. The results found in this study confirmed the hypothesis that pinus production is affected by pedologic variables, and that this information can be predicted using digital soil mapping.

Keywords: forest soils, forestry, digital soil mapping.

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis topográficas derivadas do MDE	38
Tabela 2 - Composição de classes taxonômicas identificadas no conjunto 1	46
Tabela 3 - Estatística descritiva do conjunto 1 por classe de solo	48
Tabela 4 - Estatística descritiva dos dados químicos do conjunto 1	51
Tabela 5 - Estatística descritiva dos dados físicos do conjunto 1	53
Tabela 6 Estatística descritiva das variáveis dendrométricas do conjunto 1	55
Tabela 7 - Coeficientes de correlação de Spearman entre variáveis do conjunto 1	58
Tabela 8 - Medidas de estatísticas descritivas do conjunto 2	65
Tabela 9 - Coeficientes de correlação de Spearman entre variáveis do conjunto 2	67
Tabela 10 - Resumo estatístico das FPS geradas por dois métodos multivariados com diferentes conjuntos de variáveis preditoras	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – (A) Identificação de árvores dominantes; (B) Curvas de índice de sítio	19
Figura 2 - Modelo scorpan e planos de informação	29
Figura 3 - Localização da área da Empresa nos municípios de Campo Belo do Sul e Capão Alto, Estado de SC, Brasil (A) e ampliação da área com mapa de solos (B)	34
Figura 4 - Gráfico climático de Campo Belo do Sul	35
Figura 5 - Área de estudo, com indicação da área produtiva e parcelas de inventário contínuo contento os índices de sítio e respectivos valores de altura dominante	36
Figura 6 - Modelo digital de elevação e distribuição dos pontos de amostragem 1 e 2	39
Figura 7 - Fluxograma geral da metodologia	45
Figura 8 - Topossequência de solos representativos da área de estudo.....	47
Figura 9 - Primeira e segunda componente principal do conjunto 1	56
Figura 10 - Distribuição do tamanho de partículas das amostras de solo do conjunto 2 e a sua relação com a profundidade (preto: 0 - 20 cm, vermelho: 20 - 40 cm, verde: 40 - 60 cm e azul 60 - 100 cm)	64
Figura 11 - Gráficos da correlação linear de Spearman entre as variáveis pedológicas e topográficas com maior correlação com as variáveis dendrométricas	69
Figura 12 - Perfil de elevação da paisagem e sua relação com a profundidade do solum (área hachurada em cinza) e altura das árvores (sem escala)	70
Figura 13 - Escala de importância de variáveis preditoras da profundidade do solum (A) conjunto A e (B) conjunto B	75
Figura 14 - Mapa de predição da PS a partir do mapeamento digital do solo baseado no modelo RF	77
Figura 15 - Mapa de declividade	77
Figura 16 - Escala de importância de variáveis preditoras da espessura do horizonte A (A) conjunto A e (B) conjunto B	79
Figura 17 - Mapa de predição da EA a partir do mapeamento digital do solo baseado no modelo RF	81
Figura 18 - Mapa de predição da PS com a delimitação de áreas produtivas e os índices de produtividade de sítio das parcelas de inventário contínuo, conforme a altura das árvores em metros.	82

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO GERAL	12
1.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
1.1.	SOLO.....	13
1.2.	SOLOS FLORESTAIS	15
1.3.	CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIO FLORESTAL.....	18
1.3.1.	O solo como fator para classificação de sítio florestal	20
1.4.	Pinus taeda L.....	23
1.5.	O SOLO E A VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DENDROMÉTRICOS DO PINUS.....	24
1.6.	MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS	27
1.6.1.	Pedometria e funções de predição do solo.....	30
2.	HIPÓTESES	32
3.	OBJETIVO GERAL.....	33
3.1.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	33
4.	MATERIAL E MÉTODOS.....	33
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	33
4.2.	OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS	37
4.2.1.	Obtenção das variáveis topográficas	37
4.2.2.	Obtenção das variáveis pedológicas	38
4.2.2.1.	Análise Laboratorial	40
4.2.3.	Obtenção das variáveis dendrométricas	41
4.3.	ANÁLISE DOS DADOS	42
4.3.1.	Construção e avaliação das FPS	43
4.3.2.	Predição espacial	44
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
5.1.	CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO CONJUNTO 1	46
5.1.1.	Caracterização das variáveis morfológicas do solo	47
5.1.2.	Caracterização das variáveis químicas do solo.....	50
5.1.3.	Caracterização das variáveis físicas do solo	52
5.1.4.	Caracterização das variáveis dendrométricas	55
5.2.	CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO CONJUNTO 1	57
5.3.	CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO CONJUNTO 2	64
5.4.	CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO CONJUNTO 2.....	66
5.5.	FUNÇÕES DE PREDIÇÃO.....	70
5.5.1.	Predição da PS	72
5.5.2.	Predição da EA	78
5.5.3.	Sugestão de aplicação das predições no setor florestal	81
3.	CONCLUSÕES	82
4.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
	APÊNDICES.....	95

1. INTRODUÇÃO GERAL

Segundo projeções da FAO, em 2050 a população mundial irá atingir a marca de nove bilhões de pessoas. Esforços serão necessários para suprir as demandas alimentares, de moradia e de energia para essa população. Diante disso, a pressão exercida sobre os recursos naturais, especialmente sobre o solo, tende a ser cada vez maior, por se tratar de um fator limitante para a produção. Essa projeção é ainda mais alarmante quando consideramos que 33% dos solos do mundo já estão degradados (FAO, 2015).

A principal estratégia para suprir estas demandas é trabalhar em prol de eficiência produtiva. Formas de produção mais harmoniosas, com o equilíbrio entre a produtividade e a capacidade de uso das terras devem ser alcançadas para otimizar a utilização, garantir a perenidade dos recursos e tornar o processo produtivo mais sustentável. Assume-se então a necessidade de aumentar a oferta de produtos à medida que se chega aos limites da expansão florestal, sem comprometer a sustentabilidade dos recursos naturais. Manter estas demandas, paralelo à redução do desmatamento será um dos maiores desafios do setor florestal. Em razão disso, a demanda por informações de solo em escala local, regional, nacional e global tem aumentado (MCBRATNEY et al., 2014).

Na silvicultura, por se tratar de ciclos longos, associados à imobilização de grandes áreas, a tomada de decisão dentro do processo produtivo é ainda mais complexa que em outras atividades agrícolas. Para abastecer o mercado de maneira mais rentável possível, se exige cada vez mais assertividade e precisão nas tomadas de decisão. Logo a utilização de práticas refinadas de planejamento, que consideram as relações que ocorrem dentro da floresta se torna ainda mais significativa, já que com as mesmas condições genéticas e de clima, as árvores apresentam taxas de crescimento distintas.

O número de estudos que relacionam o crescimento e produção de povoamentos florestais com aspectos do solo é crescente. As informações de solo, principalmente composição granulométrica (RIGATTO et al., 2005; DEDECEK et al., 2008), matéria orgânica (GONÇALVES et al., 2012), profundidade (MORALES et al., 2010) e pH (BARBOSA et al., 2012) são intimamente ligadas ao desenvolvimento florestal. Contudo, a utilização dessas informações específicas no planejamento florestal de modo tradicional é um processo dispendioso e informações

de solo em escalas adequadas ao planejamento, em nível de propriedade e bacia, são escassos (DALMOLIN et al., 2004), dificultando ou, até mesmo, inviabilizando o uso dessas informações.

A escassez de recursos e de tempo leva à necessidade de adoção de novos métodos que tornem os levantamentos de solos mais ágeis e menos onerosos (DALMOLIN; TEN CATEN, 2015). Nesse sentido, avanços da tecnologia computacional, sensoriamento remoto, softwares estatísticos e Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), têm possibilitado o desenvolvimento de modelos matemáticos e estatísticos, junto com informações obtidas no campo para a estimativa de atributos do solo a partir de covariáveis ambientais em um novo paradigma denominado Mapeamento Digital de Solos (MDS) (MCBRATNEY, 2003; DALMOLIN; TEN CATEN, 2015). Devido ao advento do MDS, o estudo do solo passou a ter uma abordagem diferente, com relações quantitativas existentes entre tipos de solo e/ou atributos e seu ambiente, para predizer a sua variabilidade e distribuição espacial (MCBRATNEY et al., 2003). A utilização de tecnologias para mapear o solo vem sendo objeto de pesquisa em nível mundial, principalmente durante a última década (SILVA et al., 2016; HENGL et al., 2017).

Sendo as variações dendrométricas sensíveis às variações do meio em que se desenvolvem (solo e relevo), torna-se imprescindível estudar as relações entre o solo e o crescimento da floresta. Porém, como integrar conhecimentos de solo na prática da silvicultura? Como o MDS pode auxiliar nesse processo? Pensando nisso, o objetivo geral desta dissertação foi avaliar a relação entre variáveis dendrométricas, topográficas e pedológicas e realizar a predição espacial das variáveis pedológicas mais correlacionadas com a variação dos parâmetros dendrométricos de *Pinus taeda* L.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. SOLO

O termo solo (do latim *solum*: base, suporte, superfície), diz respeito à parte superior da crosta terrestre, mais especificamente a porção superior do regolito, material de rocha alterada (KÄMPF; CURI, 2012). Segundo SSSA (2008), o solo pode ser entendido de maneira mais restrita como “material não consolidado, mineral ou orgânico, existente à superfície da terra e que serve de meio natural para o crescimento das plantas”. É constituído por partículas sólidas (minerais e orgânicas),

ordenadas espacialmente, formando a estrutura da matriz do solo por vazios, poros preenchidos com água e sais, que formam a solução do solo, e por gases, que correspondem ao ar do solo (KÄMPF; CURI, 2012).

O conceito de solo como corpo natural organizado e o estudo dos seus fatores de formação foram inicialmente postulados pelo russo Vasily V. Dokuchaev. Baseado nesses estudos, Hans Jenny formalizou as bases conceituais em 1941 propondo um modelo de equação que descreve os fatores relacionados à formação do solo. Segundo Jenny (1941), o solo (S) é função do clima (cl), dos organismos (o) e do relevo (r), agindo sobre o material parental (p) durante um período de tempo (t) e fatores desconhecidos (...). Esse modelo ficou conhecido como CLORPT (Equação 1) e representa o solo como resultado das interações entre os seus fatores de formação.

$$S=f(cl,o,r,p,t,...) \quad (1)$$

Seguindo o modelo proposto por Jenny, o solo é o resultado da interação combinatória entre os fatores de formação, a partir de processos pedogenéticos, em que os fluxos de energia e matéria são continuamente transferidos em um sistema, o que propicia uma constante evolução aos solos. Conforme Buol et al. (2011) discutem no livro *Soil Genesis and Classification*, a composição do solo que observamos resulta não apenas das condições climáticas, biológicas e topográficas atuais e do material geológico subjacente, mas também é um produto de como essas condições mudaram ao longo do tempo.

Considerando que os solos de um determinado local estão se formando em posições geográficas fixas e sobre o mesmo material de origem, durante o mesmo período de tempo e, portanto, estão sujeitos ao mesmo clima passado e presente, são as configurações da superfície que atuam fortemente nos processos de gênese do solo (BUOL et al., 2011). Nesses casos, dentro de padrões climáticos regionais, o clima passa a exercer um papel de fornecimento de energia (água e temperatura) e o relevo altera a proporção da precipitação e radiação solar que chegam ao solo nas diferentes posições da paisagem. Assim, o desenvolvimento do solo ocorre principalmente em resposta ao modo pelo qual a água se move na paisagem, modificando os fluxos de água e os processos de redistribuição de material no terreno.

Para entender esse processo é preciso considerar que os componentes inorgânicos e orgânicos do solo responderam aos insumos de energia e água, ditados pelas condições climáticas

no local onde se formaram na paisagem (BRADY; WEIL, 2013). Os gradientes topográficos causam elevada heterogeneidade espacial e temporal na distribuição da energia e no balanço de água, que influencia no regime de temperatura do ar e do solo, evapotranspiração e umidade do solo. Com isso, estes fatores afetam o padrão espacial dos processos naturais, dentre eles a distribuição das variáveis do solo na paisagem.

O solo desempenha diversas funções no ambiente. Além da importância socio-econômica e cultural, o solo é uma das principais reservas de biodiversidade do planeta. É habitat de bilhões de microrganismos de centenas de espécies, e a presença destes organismos contribui, direta ou indiretamente, para a decomposição da matéria orgânica e estruturação do solo, para o ciclo e liberação de nutrientes e água às plantas (MOREIRA et al., 2008). Em relação à esses ciclos, o solo funciona como regulador ambiental atuando como filtro, acumulador, amortecedor e transformador de diversos compostos de ciclos biogeoquímicos (BAYER; MIELNICZUK, 1999; STOCKMANN et al., 2015).

Além disso, o solo é o armazenador e fornecedor de água e nutrientes às plantas. Através da expressão de fenômenos físicos de adsorção e capilaridade, o solo é capaz de reter a umidade que chega por precipitação, atuando diretamente no ciclo hidrológico do planeta, favorecendo a filtragem, a captação e infiltração de água e, com isso, a recarga e qualidade dos aquíferos (COELHO et al., 2014).

Ainda, a principal função do solo é servir como suporte para a produção de biomassa, ou seja, para o crescimento de plantas. Está na base da vida humana e animal por viabilizar a produção de alimentos, bioenergia e produção de fibra, garantindo, portanto a vida no planeta. Nesta perspectiva, mesmo sendo um recurso multifuncional, a expressão desses serviços depende do uso que lhe é dado. Assim, a intensidade de cada sistema de produção e usos da terra pode permitir a compatibilização dos vários serviços ecossistêmicos em que o solo participa, garantindo a sua sustentabilidade (KÄMPF; CURI, 2012).

1.2. SOLOS FLORESTAIS

Considerando a diversidade de funções que o solo desempenha, a sua diferenciação de acordo com o tipo de cobertura e atividade exercida sobre esse torna-se importante, e é a partir destas atividades que surgem denominações como: solos agrícolas, solos florestais e solos urbanos

(ROVEDDER et al., 2013). A distinção de solo florestal, amplamente caracterizada na literatura, comprova que a cobertura florestal confere ao solo características específicas, que contribuem para o melhor entendimento sobre a sua gênese, biodinâmica e conservação.

Apesar de não haver ainda um consenso sobre qual a melhor definição para o termo, para Rovedder et al. (2013) o conceito de solo florestal com maior aplicabilidade para fins de manejo e conservação é aquele que considera cobertura florestal no momento presente, tanto sob floresta nativa quanto sob floresta plantada. Esse conceito considera que em ambas a intensa influência do sistema radicular, a forte ação de organismos específicos associados à vegetação e a formação de uma camada de resíduos, denominada serapilheira, diferenciam os solos florestais de outros solos (DICK; SCHUMACHER, 2015).

Dentre estas características, talvez a principal seja a presença da serapilheira, camada orgânica contendo todo material oriundo da comunidade vegetal que se encontra sobre o piso florestal, incluindo folhas, galhos, resíduos e material reprodutivo como flores e frutos (SCHUMACHER, 1999). A dinâmica que envolve esses materiais caracteriza-se principalmente pela entrada de serapilheira no sistema via deposição e pela sua saída a partir da decomposição e mineralização (FERREIRA et al., 2007). Esse processo é denominado ciclo biogeoquímico (BERTALOT et al., 2004), pelo qual quantidades expressivas de nutrientes retornam ao solo e contribuem significativamente para a sua fertilidade (SALVADOR, et al. 2014).

Nos solos florestais a influência do sistema radicular é maior e os solos tendem a ser mais estruturados, exigindo um menor controle sobre os processos erosivos e, comumente, devido aos elevados teores de matéria orgânica na camada superficial, apresentam um horizonte orgânico (horizonte O). A atividade florestal, portanto, tem influência direta sobre o ambiente, especialmente sobre o solo, e é capaz de provocar profundas modificações nos ecossistemas (SCHUMACHER, 1999). Um exemplo das possíveis modificações que o uso confere ao solo esta descrito no trabalho de Yesilonis et al. (2016), que mostra a influência antrópica nos ecossistemas florestais e como os solos evoluem em condições de floresta. Nele, os autores observaram a transformação nas propriedades do solo de florestas com diferentes idades e históricos de perturbação e constataram o aumento da espessura dos horizontes superficiais. Os autores sugerem que os solos florestais mais jovens terão alterações nas propriedades do solo com o passar do tempo, principalmente na diminuição no pH, na perda de nitrato e cátions juntamente com um aumento nos teores de alumínio (Al) e matéria orgânica (MO).

Além disso, florestas costumam estabelecer padrões fitossociológicos associados ao ambiente, onde mudanças nas características do solo afetam diretamente na distribuição das comunidades arbóreas. Dick; Schumacher (2015), em uma revisão sobre as relações do solo com fitofisionomias em florestas naturais, afirmam que as condições do solo, incluindo propriedades químicas, físicas, biológicas e até mesmo o relevo e o regime de umidade, exercem influência sobre espécies. Em decorrência, é possível identificar o predomínio de determinada tipologia florestal em condições específicas. Logo, informações de solo são passíveis de auxiliar na detecção desses padrões.

Na literatura, vários trabalhos buscam encontrar estes padrões (SCIPIONI, et al., 2012; KILCA et al., 2015). Por meio de correlações Calgaro et al. (2015), avaliaram áreas com diferentes níveis de antropização, aspectos silviculturais e variáveis químicas do solo para caracterizar o tipo de vegetação. A partir das relações construídas, concluíram que as variáveis químicas do solo, associados ao nível de antropização e conservação das áreas, influenciaram na ocorrência natural, diversidade de espécies e desenvolvimento dos indivíduos arbóreos.

Relacionando as variáveis físicas e químicas do solo ao longo de um gradiente florestal Moreno; Schiavini (2001) verificaram a existência de relação entre a distribuição de espécies arbóreas e variáveis pedológicas, principalmente granulometria e composição química. Da mesma forma, Rovedder et al. (2014) identificaram como diferenciadores dos ambientes, o pH, cálcio (Ca), capacidade efetiva de troca de cátions (CTCef), saturação por alumínio (m%) e saturação de bases (V%) dentro de um fragmento de Floresta Estacional Decidual, enfatizando a importância das variáveis pedológicas na distribuição das espécies.

Estudando a influência do regime de água e da fertilidade química dos solos de uma floresta nativa, Botrel et al. (2002) verificaram que as propriedades do solo foram significativas na distribuição de espécies e, além disso, várias espécies apresentaram correlações significativas entre sua abundância nas parcelas e as classes de drenagem e V% dos solos, ressaltando essa importância. Braga et al. (2015) encontraram correlação significativa entre a distribuição das espécies arbóreas avaliadas no perfil topográfico e a fertilidade do solo em um fragmento florestal no Estado de Minas Gerais. Em estudo semelhante, porém com o enfoque em classes de solo, Kotchetkoff-Henriques et al. (2005) determinaram as espécies indicadas para recuperação da vegetação natural em um remanescente no Município de Ribeirão Preto em Minas Gerais, após verificar a existência de três grupos florísticos associados a diferentes classes de solo.

O solo representa assim um importante papel para a estrutura vegetal e compreender essa relação existente é um subsídio imprescindível na tomada de decisão. Quando se trata de floresta nativa, como nesses casos, essas informações permitem a adequação de espécies para programas de recuperação/recomposição da vegetação, em que a partir do entendimento destas relações é possível estabelecer estratégias de conservação dos fragmentos de vegetação, adotar práticas adequadas de uso e assumir critérios de manejo adequados ao desenvolvimento da floresta. Na silvicultura, porém, além da necessidade de se conhecer o solo para o planejamento sustentável de uso, essa preocupação assume uma importância financeira relacionada à produtividade, ou seja, a capacidade do solo em produzir madeira. O conhecimento sobre as condições que o ambiente oferece para o desenvolvimento de espécies é fundamental para prever a quantidade e qualidade da produção, as possibilidades do manejo com máquinas adequadas ao solo e a adaptabilidade da espécie ou espécies aos determinados habitats (CALDEIRA et al., 1996).

1.3. CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIO FLORESTAL

Durante o manejo de florestas comerciais, a maioria das decisões envolve avaliação da capacidade produtiva das áreas florestais em estado de ordenação, utilizando estas áreas homogêneas. A determinação da capacidade produtiva das áreas é fator básico na condução de povoamentos e no planejamento da produção madeireira, pois esses índices são utilizados na previsão de tratos e métodos de manejo da floresta conforme o desempenho projetado para a espécie em cada sítio. A classificação da capacidade produtiva do local permite alocar recursos conforme a capacidade de retorno. Logo, o estudo das relações entre o solo e a floresta tem como objetivo comum definir áreas, sítios ou unidades de manejo (UM) homogêneas que potencializem o desenvolvimento florestal e facilitem as operações de manejo e ordenação florestal. Como são muitas as maneiras de se determinar o potencial produtivo de um local pelos elementos que o compõe, a avaliação do potencial de sítio é um processo bastante complexo (SCHNEIDER; SCHNEIDER, 2008).

A classificação da floresta em sítio é uma forma de estratificação do povoamento em áreas mais homogêneas com base nas características da vegetação ou em fatores do meio ou numa combinação destes. Assume-se então a qualidade do sítio como sendo a soma total dos fatores

edáficos, biológicos e climáticos que afetam as plantas (CALDEIRA et al., 1996; SCOLFORO, 1998).

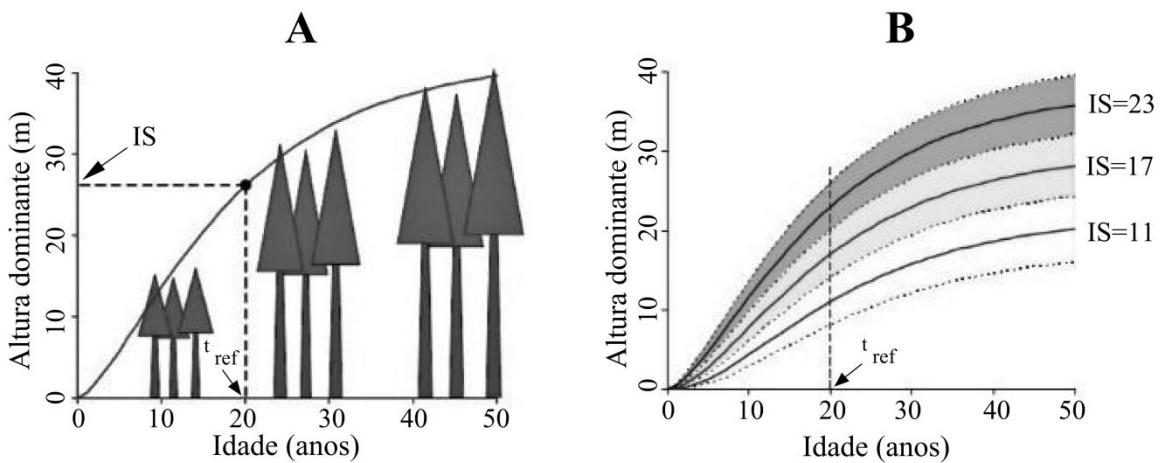
Para Santos et al. (2009), o crescimento das árvores é governado por dois fatores: o genético, de origem hereditária e as condições do meio. O primeiro fator pode ser sanado pela seleção ou melhoramento da espécie através da aquisição de sementes ou mudas de melhor qualidade, enquanto que o segundo fator é afetado pelas condições locais, que poderão ou não oferecer as condições necessárias para o desenvolvimento das plantas. Burger (1980) divide esses fatores em cinco metodologias de classificação de sítio, sendo elas: mediante fatores climáticos, fatores edáficos, a vegetação baixa, a classificação multifatorial e mediante elementos dendrométricos do próprio povoamento. Porém, na literatura, de modo geral, assume-se duas linhas de método: o dendrométrico e o ecológico.

O método dendrométrico realiza a classificação dos sítios a partir da capacidade produtiva de cada unidade, expressa por uma variável mensurável: altura dominante (H_{dom} , em m), área basal (G , em m^2ha^{-1}) e volume de madeira (V , em m^3ha^{-1}). Essas informações dendrométricas são retiradas de parcelas amostrais fixas de inventário florestal contínuo (IFC), onde H_{dom} é média de altura das 100 árvores de maior perímetro basal da parcela (PÉLLICO NETTO, BRENA, 1997), representada na figura 1A.

Uma vez estabelecido o plantio florestal, é possível determinar a potencialidade do sítio onde este se encontra mediante avaliação da capacidade produtiva do local em função das variáveis dendrométricas, mensuradas anualmente para acompanhamento dos incrementos, pelo IFC. A partir dai são estabelecidos índices de produtividade para cada sítio ou índices de sítio (IS). A classificação por índices de local considera que todos os fatores ambientais são refletidos de modo interativo no crescimento em altura, a qual também está relacionada ao volume de madeira.

Dentre as técnicas existentes para classificação destes IS, a mais difundida é aquela onde se empregam curvas de índice de local (Figura 1B), determinadas através do uso da altura dominante das árvores. Este método pode ser ainda classificado quanto ao tipo de curva empregado (curvas polimórficas ou monomórficas) (BURGER, 1980; SCHNEIDER; SCHNEIDER, 2008).

Figura 1 – (A) Identificação de árvores dominantes; (B) Curvas de índice de sítio



Fonte: Adaptação de Agustín (2011).

Como a classificação dendrométrica é realizada após a implantação da floresta, o potencial produtivo das terras é desconhecido antes do plantio. Surge assim, a necessidade de utilizar outras informações como variáveis climáticas, juntamente com componentes do balanço hídrico, classes de solos e informações de relevo para a seleção de ambiente e delimitação de sítios florestais, seja como ferramenta ou como complemento aos métodos tradicionais (PAIVA et al., 2010).

1.3.1. O solo como fator para classificação de sítio florestal

Pesquisas envolvendo condições físicas de sítios, em especial o solo, têm se dedicado a encontrar ambientes que propiciem condições ótimas de produção. Entra aí o método ecológico de classificação de sítio, que envolve variáveis químicas e físicas do solo, topográficos e climáticos da região estudada. Scolforo (1993) define este método de classificação como sendo indireto baseado em atributos do sítio. Estes atributos podem ser classificados como fatores primários, quando são dependentes do ecossistema ou comunidade florestal, como, por exemplo: macroclima, topografia, rocha de origem, ou seja, características climáticas e fatores secundários, quando são desenvolvidos e influenciados por componentes do ecossistema, como: microclima, solo florestal, matéria orgânica, regime de umidade e lençol freático.

Seguindo estes métodos, a classificação de sítio pode considerar tanto classes quanto variáveis do solo para distinção de ambientes, através de métodos matemáticos, estatísticos e geoestatísticos. Como exemplo desse tipo de classificação, a classe de solo foi utilizada por Pereira

et al. (2012) para avaliar a qualidade de solos em duas florestas plantadas. No estudo, áreas com predomínio de Cambissolos refletiram em sítios florestais de pior qualidade, demonstrando que os sítios podem ser classificados com base em informações de solo, constatada pela menor disponibilidade hídrica dos Cambissolos, que resultaram em menor produtividade.

Estudando a influência das características na produção de *Araucaria angustifolia* (pinheiro-paraná) Santos et al. (2010) utilizaram a análise de agrupamento e análise discriminante para avaliar a relação entre os grupos de solos formados e os valores dendrométricos das árvores. As variáveis morfológicas, físicas e químicas do solo estudadas pelos autores explicaram, respectivamente, 45 %, 18,1 % e 10,5 % da variação do sítio. Como conclusão, foram determinados cinco grupos de parcelas em função de características de solos, sendo mais importantes, em ordem decrescente as variáveis: profundidade, densidade, macroporosidade, areia fina, nitrogênio e cálcio, e apenas duas classes de sítio, sendo o pior deles representado pelas parcelas localizadas sobre solos com profundidades menores que 1 m, declividades superiores a 10 % e com más características químicas e físicas.

Em estudo de Pelissari et al. (2012), ao investigar as correlações espaciais dos atributos químicos do solo evidenciaram menor crescimento da teca (*Tectona grandis L.*) em menores níveis de pH, K, Ca e Mg no solo, além da relação inversa com o Al. Estes resultados permitiram aos autores estabelecer correlações capazes de auxiliar nas intervenções silviculturais e direcioná-las para as diferentes condições de solo de cada sítio.

Os trabalhos que relacionam a produtividade florestal com variáveis do solo e/ou relevo normalmente utilizam técnicas de estatística uni ou multivariada, porém atualmente, técnicas de geoprocessamento associadas à geoestatística têm ganhado espaço na literatura. Para caracterizar as zonas específicas de manejo do solo e indicar atributos do solo eficientemente relacionados com a produção, Passos-Carvalho et al. (2012) empregaram correlações espaciais e de Pearson entre produtividade de madeira de *Eucalyptus* sp. e variáveis físico-químicas do solo. Além da estatística, o método de cokrigagem foi utilizado para admitir a existência de um atributo (solo e/ou planta) que pudesse espacialmente funcionar como indicador de qualidade, isto é, caracterizar as zonas específicas de manejo. Como resultado, o diâmetro basal e a densidade do solo apresentaram estreitas correlações com o volume de madeira sendo, portanto, potenciais indicadores de produção da espécie.

Outro exemplo é o trabalho de Ortiz et al. (2006) que utilizaram métodos de geoprocessamento e geoestatísticos para estudar as relações entre o potencial produtivo de uma floresta representado pelo IS de um talhão de *Eucalyptus grandis* no Estado de São Paulo e variáveis do solo e relevo. A partir de uma amostragem sistemática os valores referentes às variáveis foram interpolados, gerando modelos digitais de superfície contínua. Por meio de análise de correlação (pixel-a-pixel) entre mapas e regressão espacial, foram realizadas correlações entre o potencial produtivo e variáveis do solo e do relevo, assim como o ajuste de modelos capazes de predizer o valor de IS por meio dos valores desses atributos. Os autores concluíram que áreas de maior potencial produtivo apresentaram menores teores de alumínio, argila total e umidade, além de maiores teores de manganês, soma de bases, areia total e areia muito grossa, ocupando também cotas mais baixas do terreno. O modelo de regressão linear múltipla espacial ajustado explicou 79 % das variações do IS.

Também referente à produtividade de *Eucalyptus* sp., Rufino et al. (2006) aplicaram técnicas de geoestatística e geoprocessamento para o mapeamento da variabilidade espacial do potencial produtivo e variáveis do solo em dois projetos com clones da espécie. Para isso, os autores utilizaram dados dendrométricos e de análise química e física do solo para gerar mapas via krigagem ordinária exponencial. O emprego da análise geoestatística combinada a técnicas de geoprocessamento mostrou-se eficaz para mapear a variabilidade espacial da produtividade e das variáveis do solo. Os autores observaram uma relação entre os mapas das variáveis: diâmetro médio quadrático, área basal, altura dominante e altura total, onde ficaram bem definidas as áreas de maior e menor crescimento, que, segundo os autores, condiz com as informações observadas em campo.

Bognola et al. (2008), em estudo para avaliar a variabilidade espacial de rendimento de pinus em função de teores de argila do solo, afirmam que a integração de geoprocessamento com técnicas geoestatísticas, através da cokrigagem ordinária multivariada, permite definir com boa precisão unidades de manejo para a espécie. Entre as técnicas utilizadas pelos autores estão análise de trilha, análise de componentes principais (ACP), análise fatorial (AF), análise de agrupamento (AAG) e regressão linear múltipla (MLR) que estimaram as propriedades de maneira coerente, e, portanto, apresentam grande potencial para uso nesse segmento.

Em um estudo no Estado do Mato Grosso do Sul, Barbosa et al. (2012) definiram o pH com apreciável indicador da qualidade química do solo para estimar a produtividade de madeira. Para chegar nesse resultado, os autores analisaram a produtividade de madeira do *Pinus caribaea* var.

hondurensis em função de algumas variáveis físicas e químicas de um Latossolo Vermelho Distrófico de uma floresta com 21 anos de idade. Os autores selecionaram, entre as variáveis, aquele que melhor explicou a variabilidade da produtividade de madeira. Em cada ponto amostral, dos 121 definidos por grid regular, foram obtidos os valores de resistência à penetração (RP), umidade gravimétrica (UG), pH, matéria orgânica do solo (MOS), perímetro à altura do peito (PAP, em m) e altura da árvore (h, em m). Como resultado, a produtividade de madeira variou diretamente com o pH do solo, tanto linear quanto espacialmente na camada 0-20 cm.

Como o crescimento das árvores não é indiferente a qualquer tipo de solo e a seleção de variáveis na determinação do ambiente varia conforme a espécie em questão, a identificação de ambientes potenciais para o desenvolvimento de florestas é fundamental (CALDEIRA, et al. 1996). Para ampliar a compreensão do ecossistema florestal são necessárias pesquisas mais abrangentes, com metodologias e análises mais precisas, que contemplem o maior número possível de variáveis para explicar os reflexos das relações entre o solo e a vegetação (DICK; SCHUMACHER, 2015).

1.4. *Pinus taeda* L.

O *Pinus taeda* L. ou pinus é uma espécie florestal originária do Sul e Sudeste dos Estados Unidos (SHIMIZU; AMARAL, 1987), introduzido no Brasil na década de 30 (KRONKA et al., 2005) e aqui é conhecido popularmente como pinheiro-amarelo, pinheiro-rabo-de-raposa, pinheiro-do-banhado, pinus e pinho-amarelo (LORENZI et al., 2003). A árvore produz copa densa, casca gretada e ramos acinzentados. As folhas são aciculares, verde-escuras e reúnem-se em grupos de 3 por fascículo, medindo de 15 a 20 cm de comprimento (MARCHIORI, 1996). A madeira é valorizada por apresentar cor clara, com fibras longas usadas para produção de celulose, empregada na fabricação de papel de alta resistência para embalagens e papel de imprensa. Fornece madeira para serraria, construção civil, movelearia, laminados, compensados, entre outros. Consequência da boa produtividade e qualidade da madeira aliada a facilidade dos tratos culturais e rápido crescimento, a espécie tornou-se tradicional para plantios comerciais (FILHO et al., 2001).

Segundo a Indústria Brasileira de Árvores - IBA (2016), com base nos levantamentos de 2015, a silvicultura ocupa uma área de 7,80 milhões de hectares. Nesse espaço, os plantios de pinus ocupam 1,6 milhão de hectares (20,7 %) e lideram o ranking global de produtividade florestal da espécie, com produtividade média dos plantios de $31\text{ m}^3\text{ ha ano}^{-1}$, com plantios concentrados

predominantemente no Sul do Brasil, sendo o Estado Paraná (42 %), Santa Catarina (34 %) e Rio Grande do Sul (12 %) os maiores produtores.

Espécies do gênero *Pinus* possuem a capacidade de produzir extensos sistemas radiculares, especialmente em solos profundos e de textura grossa, são capazes de sobreviver a severas condições de falta de nutrientes e de água, pois através de seu sistema radicular, conseguem explorar um grande volume de solo, concentrando suas raízes nas camadas que apresentem melhores condições edáficas ao seu desenvolvimento (LOPES et al., 2014). Estudos que relacionam o crescimento de pinus com aspectos do solo costumam considerar até 30 ou 40 cm de profundidade (RIGATTO et al., 2005; DEDECEK et al., 2008; BARBOSA et al., 2012), justificado pela presença de um maior número de raízes finas, portanto maior interação solo-planta (MORALES, 2007; SCHUMACHER et al., 2005; LOPES et al., 2010). As camadas mais profundas do solo, além de serem importantes para fixação, exercem uma influência maior em períodos mais secos, quando a umidade nas camadas mais superficiais fica mais restrita.

1.5. O SOLO E A VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DENDROMÉTRICOS DO PINUS

Para avaliar a influência do sítio no crescimento do pinus, Dedecek et al. (2008) selecionaram, em área de plantio comercial no Estado do Paraná, oito sítios de pinus aos 22 anos de idade, diferenciados pelo tipo de solo (Latossolo e Cambissolo), textura (argilosa e média) e vegetação original (campo e floresta). Para a caracterização dos sítios, realizaram avaliações dendrométricas de 50 árvores por sítio e analisaram o solo em 3 profundidades (0-10, 10-20 e 20-30 cm), para determinação das variáveis químicas (macroelementos, CTC e matéria orgânica) e físico-hídricos (densidade do solo, condutividade saturada, disponibilidade de água e profundidade efetiva). O modelo de regressão linear simples (RLS) e os coeficientes de correlação foram utilizados para essa avaliação. Conforme os resultados encontrados por estes mesmos autores, a altura das plantas foi mais influenciada pela textura do solo, sendo que em solos de textura argilosa as alturas são maiores do que em solos de textura média. Apenas os valores de diâmetro a altura do peito (DAP) apresentam diferenças significativas, considerando-se as classes de solo Cambissolo e Latossolo. O solo do sítio mais produtivo apresentou menor porosidade total e macroporosidade, maior densidade do solo e maior teor de água disponível, sendo que esta última variável apresentou a maior correlação positiva com as variáveis de crescimento. Para a maioria

das variáveis de crescimento avaliadas foram verificados os maiores teores de K e P, pH, maior saturação de bases e menor saturação por Al. Porém, de modo geral correlações das variáveis químicas do solo com as variáveis de crescimento foram baixas.

No intuito de utilizar informações de classes de solo no planejamento florestal, Bognola (2007) aplicou a estatística multivariada em informações de classe de solo, características físico-hídricas e químicas dos solos e parâmetros do meio físico (relevo, altitude, etc.) para a definição de áreas homogêneas de produtividade, baseados no IS da espécie. Para reunir as parcelas florestais em grupos de variância interna homogênea, as variáveis mensuradas foram selecionadas pelos métodos de ACP e AF. Posteriormente, os grupos formados foram correlacionados com as classes de solos identificadas em cada parcela por meio de ACC. Não foi encontrada uma boa correlação com as classes de solos e as diferenças de IS para o povoamento estudado não foram explicadas somente pela definição das classes até o quarto nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS. Porém, o autor sugere que a espessura do horizonte superficial “A”, pode ser a causa que explica a dissimilaridade na produtividade e no desenvolvimento das árvores, já que o horizonte “A húmico” dos solos variou entre 25 a 35 e até mesmo 60 cm de espessura.

Correlações entre a espessura do horizonte A e a produtividade da espécie também foram encontradas por Doldan (1990). Para tal, o autor analisou dez sítios florestais no Paraná, onde, através da análise de regressão linear simples entre a variável dependente (altura dominante) e variáveis obtidas através das análises e medições (solo e dendrométricas), foram selecionadas treze variáveis. Estas variáveis foram submetidas a dois métodos de seleção, sendo eles: "STEPWISE" e ACP. O primeiro método selecionou as variáveis: teores de zinco e nitrogênio das acículas, esqueleto do solo, capacidade de retenção de água no solo e teores de cobre nas acículas. Enquanto a ACP selecionou as variáveis: teores de nitrogênio, zinco e cobre foliares, esqueleto do solo, profundidade do horizonte superficial do solo e capacidade de retenção de água no solo. Os grupos de variáveis foram ajustados por meio de RLM pelo método dos mínimos quadrados ordinários, atingindo coeficientes de determinação (R^2) de 0,91; 0,92 e 0,91, respectivamente.

Em um estudo realizado no Paraná, Bellote; Dedecek (2006), para avaliar o efeito das variáveis físicas e químicas do solo na produtividade do pinus plantado em diferentes tipos de solo e com ritmos de crescimento variados, selecionaram, através do inventário florestal, quatro plantios com 20 anos de idade. Nestes sítios foram demarcadas parcelas e coletado dados dendrométricos

de altura e diâmetro, discos do lenho de diferentes alturas do tronco de árvores dominantes e amostras de solo nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm. As variáveis físicas consideradas pelos autores foram: composição granulométrica do solo (CGS), porosidade, resistência à penetração (RP) e água disponível. As variáveis químicas foram: pH, matéria orgânica, fósforo (P), potássio (K), cálcio+magnésio (Ca+Mg), alumínio (Al^{+3}), capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação de bases (S). Os parâmetros de crescimento e volume das árvores foram analisados e correlacionados com as variáveis do solo, sendo que, das variáveis físicas estudadas, a água disponível e a resistência do solo à penetração, em todas as profundidades avaliadas, foram as que mais se correlacionaram com o crescimento das árvores. Em relação as variáveis químicas do solo, destacaram-se SB, K, Ca, Mg e P. Além disso, os autores afirmam que restrições físicas, deficiência hídrica, compactação e impedimentos físicos do solo são situações que reduzem a expressão dos efeitos das variáveis químicas nos solos sobre o crescimento da espécie.

No Planalto Catarinense, Morales et al. (2010) avaliaram a relação entre a qualidade do solo em diferentes sítios com a produção de pinus. Para tal, em oito sítios com diferentes classes de solo e produtividade da floresta (alta e baixa), foram descritas à morfologia e realizadas análises físicas e químicas de um perfil por sítio, dentro das parcelas fixas de inventário contínuo. Como resultado, os autores verificaram maior produtividade nos perfis mais profundos, com menores densidades e resistência à penetração do solo. De modo geral, as diferenças na qualidade do solo influenciam a produtividade do pinus sendo os sítios com menor espessura do Solum, com maior densidade do solo, resistência à penetração e indicativo de compactação, os menos produtivos. A profundidade efetiva do solo também foi apontada por Castelo et al. (2008) como limitante na taxa de crescimento da espécie.

Correlações positivas entre o volume de madeira das árvores, a macroporosidade e a porosidade de aeração foram encontradas por Bognola (2010) com pinus de 12 anos de idade. As correlações entre volume de madeira das árvores e microporosidade, umidade atual e disponibilidade de água do solo foram negativas, provavelmente pela menor drenagem dos solos em área sem déficit hídrico. O maior incremento médio anual de árvores ocorreu nos solos dos sítios com maior macroporosidade e porosidade de aeração nas camadas de 5 a 10 cm e 35 a 40 cm. A textura do solo com teores muito semelhantes de areia e argila, com dominância da fração argila, proporcionou o maior desenvolvimento do pinus. Esses resultados corroboram com Correia

et al. (1996) que afirmam que a disponibilidade de água é um dos principais fatores que limitam o crescimento e a capacidade produtiva do pinus.

Compreender a relação entre as diferentes variáveis do ambiente e o crescimento de pinus é uma tarefa difícil frente à complexidade do ambiente a qual a floresta está inserida. Uma vez constatado que as informações de solo e relevo são importantes para a produtividade, surge a necessidade de utilizá-las em prol do sistema produtivo. Essa demanda por informações espaciais sobre o solo para fins de mapeamento, produção agrícola e monitoramento ambiental são ascendentes na ciência do solo. Isso é reflexo da demanda por indicadores da sustentabilidade do solo frente aos diferentes usos e a necessidade de aumento da produção sem prejuízo ambiental (MCBRATNEY et al., 2014). Portanto, compreender as relações entre o solo e a paisagem, bem como a caracterização e espacialização dos atributos de interesse, é fundamental para tornar os sistemas produtivos, incluindo a silvicultura, adequado a resiliência dos solos.

Porém, muitas vezes o mapeamento de classes pode ser insuficiente para apontar tendências de comportamento de plantas. Essa incapacidade é reflexo da imposição de limites abruptos definidas na classificação, sobretudo, tornando discretas propriedades contínuas no espaço. Pensando nisso, a compreensão e a quantificação das propriedades têm demonstrado melhor poder discriminante de ambientes em relação ao comportamento das plantas.

1.6. MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS

Mapas pedológicos são fontes primordiais de informações e servem como subsídio para o planejamento adequado de uso do solo. A partir deles é possível prever riscos de impactos de uso e definir estratégias de manejo e conservação. Além disso, possibilitam a integração dos interesses sociais, econômicos e ecológicos, seja relacionado a políticas públicas referentes à ocupação das terras, quanto nos estudos e desenvolvimentos de projetos agrícolas, pastoris e florestais.

O mapeamento de solos é realizado convencionalmente com base nas características dos solos de uma determinada área, onde essas características são descritas e classificadas de acordo com um sistema taxonômico vigente, estabelecendo-se limites entre classes definidas no mapa. Os limites dados à classe no mapeamento convencional são chamados de unidades de mapeamento e são estabelecidas de forma manual de acordo com o entendimento do pedólogo que o faz. Como depende da capacidade de interpretação, a experiência adquirida pelo profissional a respeito da

ocorrência das classes de solos na paisagem no decorrer do tempo é fundamental, e é o que dá subsídio para o mapeamento de solos (HUNSON, 1992). Porém, por depender de um modelo mental, a busca por informações e o trabalho de campo passam a ser onerosos, exigindo inúmeras expedições a campo, abertura de trincheiras e tradagens e demais atividade que exigem tempo e gastos.

Como a variabilidade espacial do solo é explicada pela interação dos vários fatores de formação, são formuladas teorias e modelos que subsidiam o conhecimento científico da distribuição de solos na paisagem (KÄMPF; CURI, 2012). Esses modelos representam uma maneira complexa de predizer os solos, em função das interações entre os fatores de formação. Sendo o solo resultado dos fatores de formação e sendo a distribuição espacial desses fatores conhecida, consequentemente o solo e suas propriedades podem ser inferidos a partir da interpretação de informações de campo e construção de um modelo conceitual, denominado de relação solo-paisagem (HUDSON, 1992). Partindo desse princípio, é possível fazer inferências sobre os tipos de solos encontrados em diferentes locais na paisagem, podendo estas ser mais ou menos explícitas, de acordo com a extensão da área (MENDONÇA-SANTOS; SANTOS, 2003).

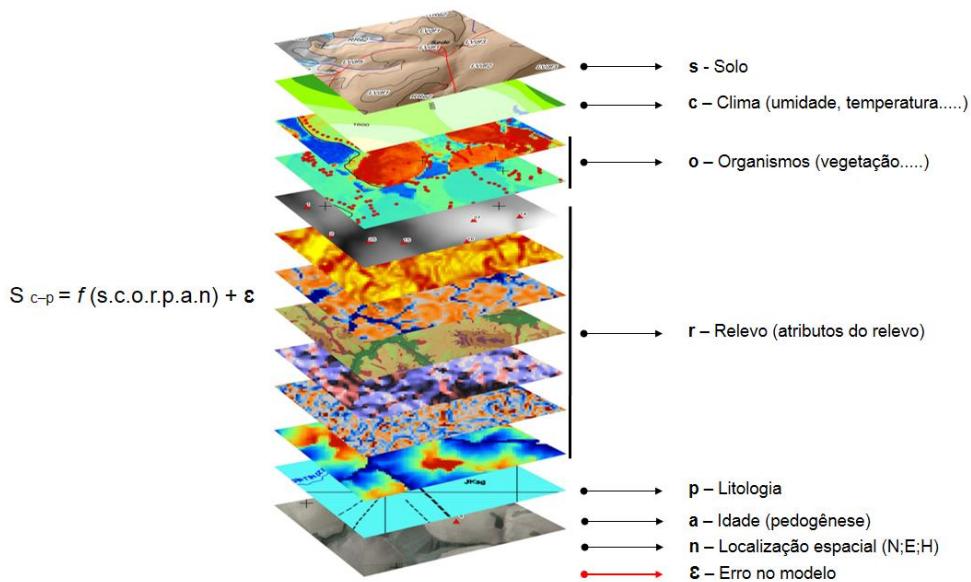
Considerando a necessidade de quantificar e compreender com precisão a distribuição espacial do solo e de suas variáveis, McBratney et al. (2003), com base no avanço da tecnologia, sugeriram algumas adições à equação de Jenny. Segundo esta proposta, o solo é considerado como produto também dele mesmo e de sua localização no espaço. Ainda, os autores mantiveram as reticências da equação (...) considerando que outros fatores podem vir a ser adicionados. Esse modelo ficou conhecido como SCORPAN (Equação 2), em que: (s): o próprio solo; (c): o clima; (o): organismos vivos; (r): atributos do relevo; (p): material de origem; (a): tempo; e (n): as coordenadas geográficas.

$$\mathbf{S} = \mathbf{f}(\mathbf{s}, \mathbf{c}, \mathbf{o}, \mathbf{r}, \mathbf{p}, \mathbf{a}, \mathbf{n}, \dots) \quad (2)$$

Essa nova abordagem que vem sendo utilizada, tanto na predição de classes, quanto na predição de variáveis do solos, denominada de MDS, é definida por Lagacherie; McBratney (2006) como “a criação e população de sistemas de informação espacial de solos através do uso de métodos observacionais de campo e laboratório, acoplados a sistemas de inferência espacial e não-espacial de solos” e se fundamenta na geração de sistemas de informações (Figura 2) que permitam formar

relações matemáticas entre variáveis ambientais e classes de solos e, dessa forma, predizer a distribuição e variabilidade espacial de classes ou atributos do solo (LAGACHERIE; MCBRATNEY, 2007).

Figura 2 - Modelo *scorpan* e planos de informação



Fonte: (WOLSKI, 2016)

Além de trazer agilidade ao processo, o MDS também visa uma solução para as incertezas inerentes ao método tradicional, analisando padrões de variação espacial dos solos, já que oferece precisão e qualidade da informação por meio de técnicas quantitativas (WEBSTER, 1984). O uso de novas tecnologias no mapeamento de solos é uma alternativa que possibilita a integração de informações de sensoriamento remoto, estatística, modelagem e sistema de posicionamento geográfico em um sistema de informação geográfica (SIG), tornando viável o levantamento de solos de forma mais rápida (DALMOLIN; TEN CATEN, 2015).

Assim, o MDS busca explicar e definir, a partir de covariáveis preditoras combinadas com informações geradas no campo, as relações entre o solo e a paisagem, tornando o processo de obtenção de mapas pedológicos menos onerosos e com maior confiabilidade das informações geradas. Para isso, informações produzidas a partir de levantamentos convencionais associadas

com covariáveis ambientais são utilizadas no treinamento de modelos para inferência de classes ou variáveis do solo em áreas não mapeadas em escala local, regional, nacional e global (TEN CATEN et al., 2012; HENGL et al., 2014; HENGL et al., 2015; TESKE et al., 2015; ARRUDA et al., 2013; SILVA et al., 2016; HENGL et al., 2017).

1.6.1. Pedometria e funções de predição do solo

Estudos quantitativos têm sido desenvolvidos em uma área de pesquisa denominada pedometria, termo derivado do grego *pedos* (solo) e *metron* (medida). A pedometria tem uma abordagem quantitativa, ou seja, é baseada na mensuração de informações e na variabilidade espacial dos solos e utiliza modelos numéricos ou estatísticos e as suas relações com as informações de solo (HEUVELINK, 2003). Portanto, é um campo interdisciplinar entre a ciência do solo, a estatística e matemática aplicada e a ciência da geoinformação, que permite compreender o funcionamento dos processos do solo (HENGL, 2003) e elimina algumas incertezas associadas ao mapeamento convencional.

A partir dessas bases quantitativas, a pedometria é a base do MDS e a partir dela são estabelecidas funções de predição espacial de solos (FPS), representadas pelo modelo SCORPAN. Segundo McBratney et al. (2003) FPS são um ajuste empírico das relações entre o solo e o ambiente em que o mesmo ocorre, o que possibilita a predição de informações desconhecidas a partir das relações criadas entre as informações conhecidas. Assim, se tornam úteis à medida que aumentam a velocidade dos levantamentos e facilitam a obtenção de dados e, portanto, diminuem os custos de obtenção e análise dos mesmos.

As FPS são construídas por modelos estatísticos (árvores de decisão, modelos lineares, modelos lineares generalizados, geoestatísticos (krigagem e cokrigagem) ou uma combinação de ambos (métodos híbridos) (MCBRATNEY et al., 2003). Dentre as variáveis utilizadas como preditoras para as FPS estão os atributos do terreno (GRUNWALD, 2009; BEHRENS ET AL., 2010). Consequência da forte influência do relevo na formação do solo, este se torna o principal fator de formação levado em consideração no MDS. Além disso, essas informações de terreno são de fácil obtenção, adquiridas de sensores remotos, modelos digitais de elevação (MDE), digitalização de curvas de nível de cartas topográficas ou de levantamentos topográficos (TEN CATEN et al., 2012).

O potencial desses classificadores está condicionado aos dados de entrada, ou seja, qualidade dos dados extraídos do modelo digital de elevação (MDE), da resolução do MDE (MOURA-BUENO et al., 2016) e da qualidade e quantidade de informações de solos (TESKE et al., 2015). Com isso, os modelos necessitam passar, primeiramente, por um processo de treinamento e, posteriormente, validação a partir de dados de solo e covariáveis ambientais que representem de forma satisfatória a relação solo-paisagem (MINASNY; MCBRATNEY, 2007).

O mapeamento de classes e variáveis do solo têm sido realizado por diferentes métodos multivariados, dentre eles, a árvore de decisão (AD) - *decision tree* (TEN CATEN et al., 2013), regressão logística múltipla (RLoM) – *multiple logistic regression* (TEN CATEN et al., 2012), máquina de vetor de suporte (MVS) - *support vector machine* (BEHRENS; SCHOLTEN, 2007), regressão linear multipla (MLR) - *multiple linear regression* (KURIAKOSE et al., 2009; SAMUEL-ROSA et al., 2013; DOTTO et al., 2014), floresta aleatória (RF) - *random forest* (GAMBILL et al., 2016), lógica fuzzy (LF)- *fuzzy logic* (MENEZES et al., 2013, SILVA et al., 2016); redes neurais artificiais (RNA)- *artificial neural networks* (CALDERANO FILHO et al., 2014) e regressão por mínimos quadrados parciais (PLSR) - *partial least squares regression* (CONFORTI et al. 2015).

Na França, Lacoste et al. (2015), ao avaliarem a profundidade do solo, compararam mapas obtidos por meio da aplicação de três abordagens. Os autores utilizaram modelagem por árvore de regressão (RTM), *gradient boosting modeling* (GBM) e *multi-resolution kriging* (MRK). Os modelos testados foram consistentes, mostrando padrão espacial semelhante à escala nacional. Independente da modelagem utilizada, a topografia mostrou ser o principal fator responsável pela variabilidade da profundidade do solo, seguido por dados climáticos, solo e de uso da terra.

Prevendo espessura de regolito (horizontes A+B+C do solo) no sul da Austrália, Wilford; Thomas (2013) utilizaram a técnica de *piecewise linear regression* (PLR). As variáveis utilizadas na predição foram 714 medições de espessura de regolito, divididas para treinamento e validação na proporção 70/30 e 29 covariáveis ambientais, incluindo a geologia, geoquímica, relevo e clima. Como resultado, os valores de profundidade variaram de 0 a 700 cm, com uma média e mediana de 125 e 60 cm, com de $R^2 = 0,70$ e erro médio quadrático (RMSE) de 92,54 cm para treinamento e R^2 de 0,64 e RMSE de 112,89 cm na validação.

No Brasil, estudos de Menezes et al. (2014) compararam o mapeamento digital e convencional de profundidade do solum em uma bacia hidrográfica localizada na região Serra da

Mantiqueira, no Estado de Minas Gerais. Nesse trabalho o mapeamento convencional do solo, com base em foto-interpretação foi comparado com o mapeamento digital de solos baseada em LF. A fim de prever a profundidade solum, os autores estabeleceram as relações solo-paisagem para predizer classes de solos. Foram quantificadas as relações entre solos e atributos do terreno e formalizaram-se relações em um conjunto de regras baseadas em LF, onde então obtiveram mapas de classes de solo e posteriormente mapas de propriedade (profundidade do solum) para comparação com o método tradicional. O mapa de profundidade do solum predito foi mais preciso e com maior detalhe em relação ao mapa derivado do mapa convencional do solo. Além disso, por apresentar a mudança de profundidade do solum de maneira gradual ao longo da paisagem o mapa mostrou-se mais realista que o mapa convencional.

Com o propósito de mapear o conteúdo de argila, areia e matéria orgânica do solo (MOS) em um solo arável da Suécia, Söderström et al. (2016) aplicaram modelos de predição em uma área compreendendo cerca de 100.000 ha. Os dados utilizados como preditores foram de três diferentes procedências, sendo elas espectrometria de raios gama, modelo digital de elevação a partir de varredura a laser aerotransportado, e dados legados sobre a geologia do Quaternário. O método multivariado de mineração de dados utilizado foi *multivariate adaptive regression splines*. Os dados de previsão provaram ser aplicáveis para mapeamento regional da textura do com RMSE de 6,5 % para argila e 13,2 % para areia.

Nesse contexto, o MDS e o sensoriamento remoto têm se mostrado ferramentas potenciais para gerar informações de solo em diferentes escalas para auxílio no planejamento de uso sustentável do solo (MCBRATNEY et al., 2014; DALMOLIN; TEN CATEN, 2015). Atualmente, o setor florestal tem buscado incorporar estas informações de solo no planejamento operacional e de plantio da silvicultura com o estabelecimento de unidades de manejo e zoneamento para silvicultura (GOMES et al., 2016; CARVALHO et al., 2013). Nesse sentido, os produtos do MDS demonstram ter potencial para servir de base para o manejo de florestas e silvicultura de precisão, sendo essa metodologia pouco explorada no setor florestal.

2. HIPÓTESES

A produtividade de *Pinus taeda* L. é influenciada pelas variáveis topográficas e pedológicas, portanto admite-se que variáveis pedológicas preditas espacialmente podem servir

como apoio para definição de sítio florestal e direcionar práticas para as diferentes condições de solo de cada sítio.

3. OBJETIVO GERAL

- Avaliar a relação entre variáveis dendrométricas, topográficas e pedológicas e realizar a predição espacial das variáveis pedológicas mais correlacionadas com a variação dos parâmetros dendrométricos de *Pinus taeda* L.

3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

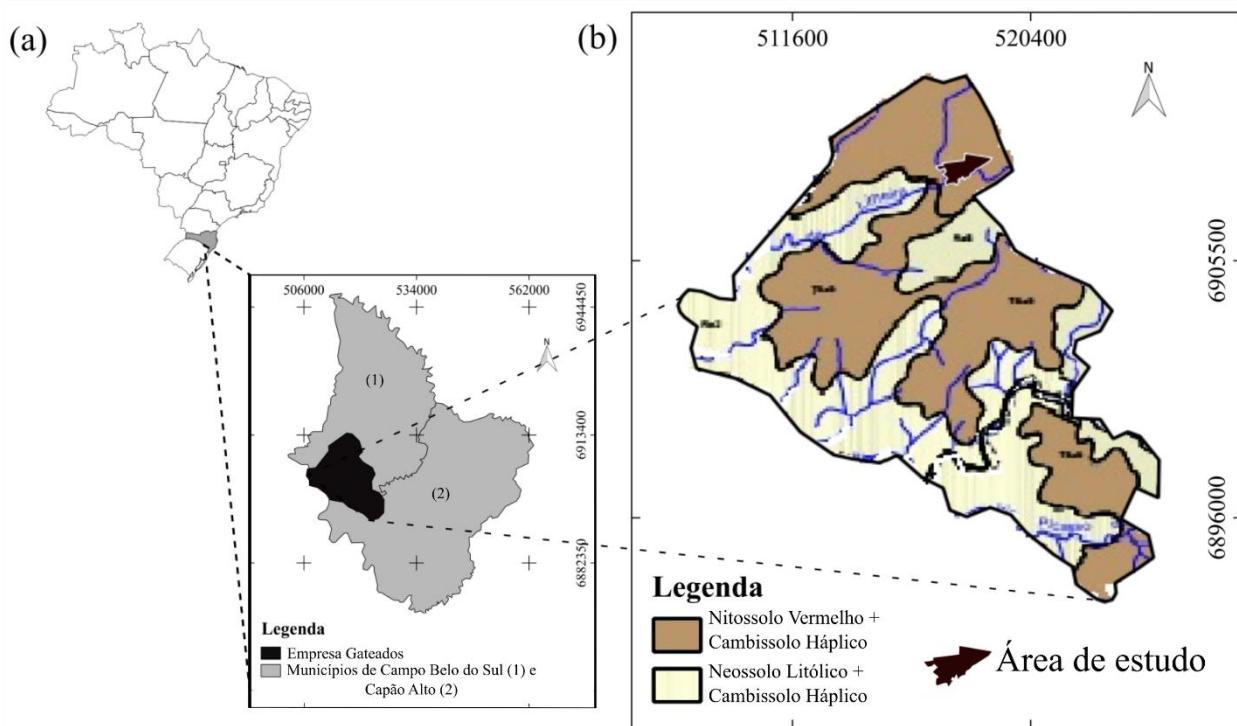
- Avaliar a relação entre variáveis dendrométricas e as variáveis topográficas e pedológicas;
- Construir funções de predição para as variáveis pedológicas mais correlacionadas com as variáveis dendrométricas;
- Realizar a predição espacial para o modelo com melhor desempenho.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi conduzida em um povoamento de *Pinus taeda* L. da Empresa Florestal Gateados Ltda, no município de Campo Belo do Sul, região serrana do Estado de Santa Catarina (Figura 3).

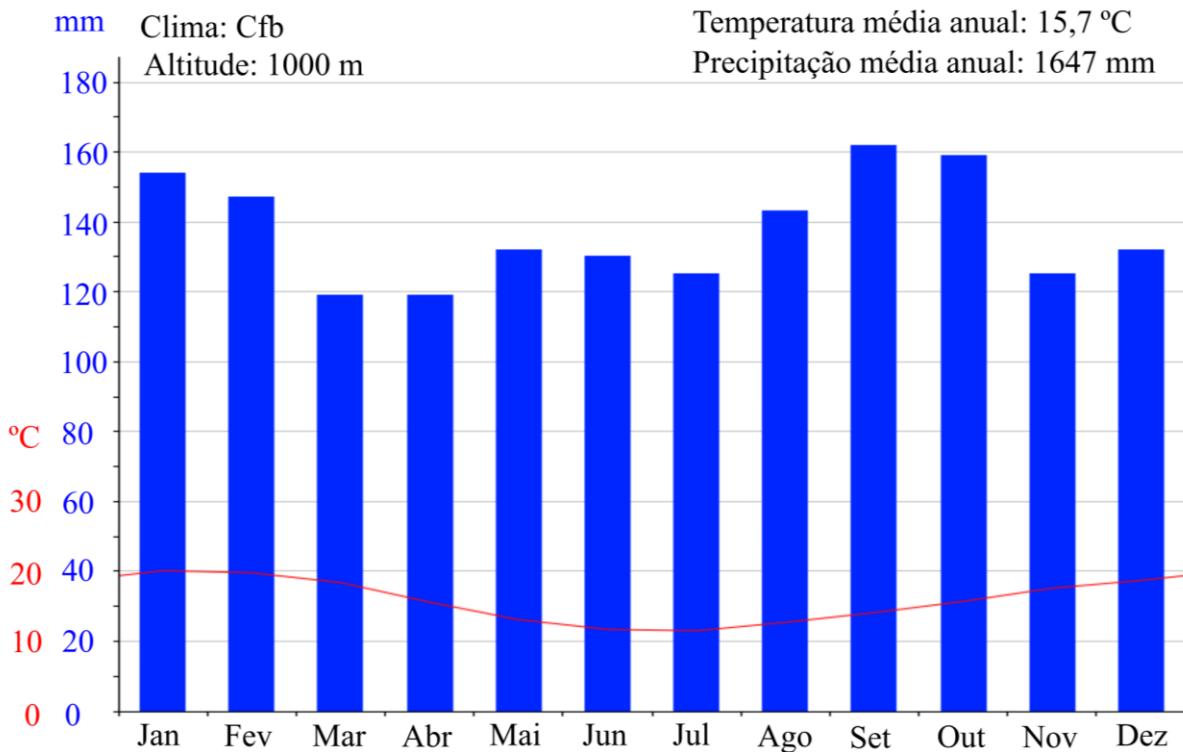
Figura 3 - Localização da área da Empresa nos municípios de Campo Belo do Sul e Capão Alto, Estado de SC, Brasil (A) e ampliação da área com mapa de solos, adaptado de Potter et al. (2004) (B)



Fonte: Autor.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima é, predominantemente, do tipo Cfb (ALVARES et al., 2013), mesotérmico, subtropical úmido, sem estações secas definidas, com a ocorrência de geadas severas. A temperatura média anual é 15,7 °C. A precipitação anual fica em torno de 1.300 a 2.400 mm com média de 1.647 mm ao longo do ano (Figura 4). A vegetação predominante da região é a Floresta Ombrófila Mista.

Figura 4 - Gráfico climático de Campo Belo do Sul



Fonte: Climate-Data.org (2017). Estação meteorológica de Campo Belo do Sul – SC (Barras em azul correspondem a precipitação mensal, linha em vermelho corresponde à temperatura média mensal)

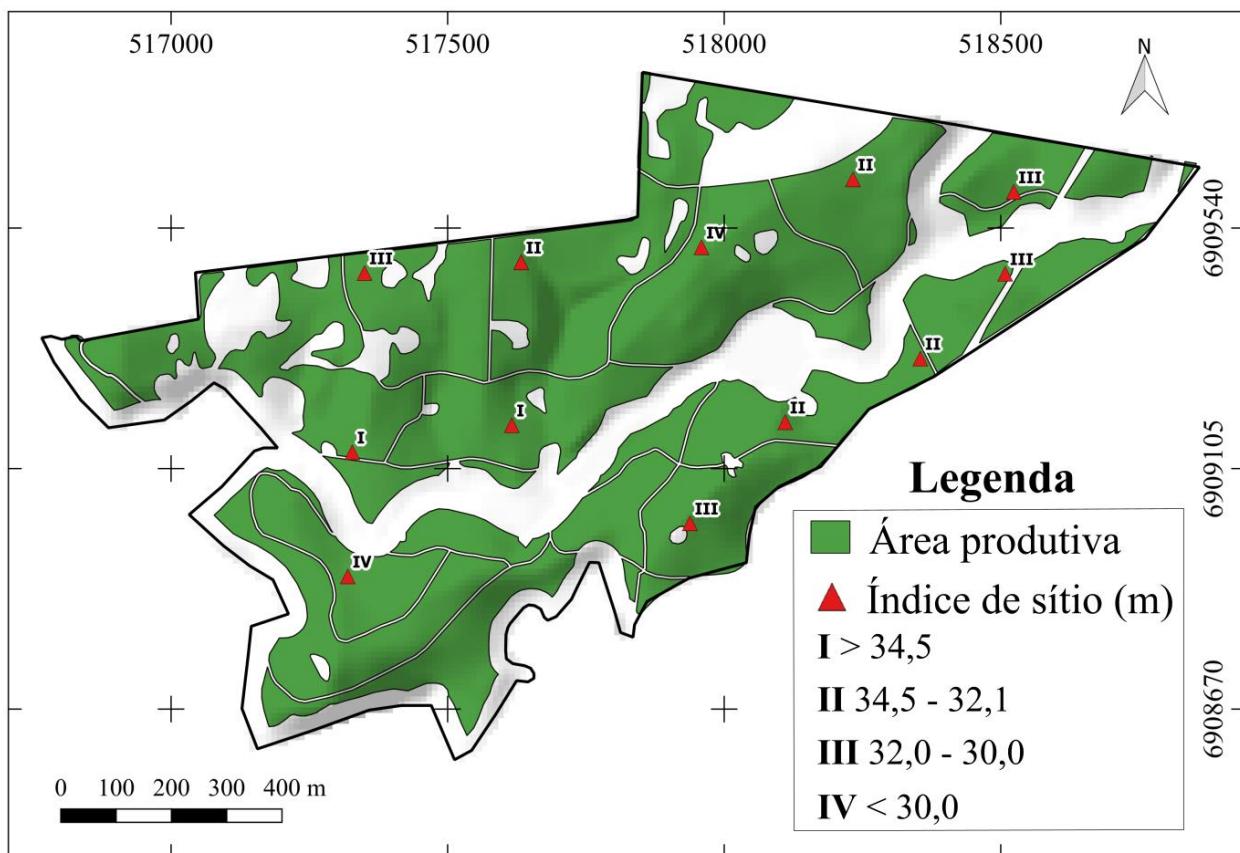
A geologia regional e local faz parte da área de ocorrência das rochas da Formação Serra Geral, sendo constituída essencialmente por uma sequência vulcânica que inclui rochas de composição básica (basalto) até ácida (riodacito). As principais informações disponíveis sobre os solos da região estão contidas no Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento nº. 46, da EMBRAPA (POTTER et al., 2004), em nível de levantamento de reconhecimento, escala de 1:250.000. Na área da empresa é possível verificar a ocorrência de três ordens de solo, sendo elas Nitossolos Vermelhos e Neossolos Litólicos ambos em associação com Cambissolos Háplicos. Porém, como se trata de um levantamento exploratório, essa escala não evidencia variações locais dos tipos de solo que ocorrem na área de estudo (Figura 3B).

De acordo com o plano de manejo, a área de plantio da empresa tem aproximadamente 7,0 mil ha de florestas plantadas para produção de madeira, destes 6,37 mil ha de *Pinus taeda* L. e *Pinus elliottii*, 140 ha de *Eucalyptus dunii*, 506 ha de Araucária, 10 ha de erva-mate e 10,5 mil ha

de área de preservação permanente e reserva legal. A altitude da região oscila entre 600 a 1.200 metros. Entretanto, a maior parte das áreas de reflorestamento da empresa está em altitudes entre 800 e 1.000 metros, com predomínio de relevo ondulado (54 %).

As condições de relevo e níveis de produtividade foram os fatores que determinaram a escolha da área de desenvolvimento deste trabalho. Assim, foi selecionado um projeto, denominado Pistola, com aproximadamente 108 ha, no qual 73 ha são de área plantada de *Pinus taeda*, com 29 anos de idade. O projeto em questão possui 12 parcelas fixas de inventário contínuo de 500 m², classificados conforme a produtividade em níveis I, II, III e IV, sendo I o sítio com melhor produtividade e IV de pior produtividade (GATEADOS, 2016) (Figura 5).

Figura 5 - Área de estudo, com indicação da área produtiva e parcelas de inventário contínuo contento os índices de sítio e respectivos valores de altura dominante



Fonte: Autor.

4.2. OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS

4.2.1. Obtenção das variáveis topográficas

Para a análise topográfica foi utilizado o MDE disponibilizado gratuitamente pelo Governo do Estado de SC - Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SIGSC, 2010), proveniente do Levantamento Aerofotogramétrico em 2010, disponível em <<http://sigsc.sds.sc.gov.br/>>. Cabe salientar que a área de estudo foi reflorestada no ano de 1987, portanto, estes dados aerofotogramétricos foram obtidos após o plantio da floresta. Assim, é possível que existam erros nos dados topográficos, oriundos do processo de filtragem de vegetação nos dados. Os dados, disponibilizados com resolução de 1 metro, foram reamostrados para 10 m utilizando a ferramenta *reamostragem* no software SAGA GIS (CONRAD et al., 2015). A opção de não utilizar o MDE original (1 metro) se deve ao fato de resoluções menores que 5 m (25 m^2) apresentarem um número insuficiente de árvores no campo (devido ao elevado espaçamento entre árvores).

A reamostragem proporcionou a representação de 100 m^2 em cada pixel, incluindo aproximadamente quatro árvores, assegurando a estimativa de um único valor de pixel em cada ponto de coleta de dados.

A partir do MDE foram derivadas com base nos valores de elevação as variáveis topográficas conforme WILSON; GALLANT (2000), utilizando a ferramenta *Terrain Analyses* do software SAGA GIS (CONRAD et al., 2015). Foram derivadas 17 variáveis (Tabela 1), selecionadas de acordo com o uso na literatura e na relação com os processos de formação dos solos e crescimento florestal.

Cada variável topográfica compôs um plano de informações (PI). Para atribuir a cada coordenada o valor de célula correspondente em cada PI, utilizou-se a ferramenta *Add Grid Values to Shapes* utilizando o algoritmo do vizinho mais próximo (*nearest neighbor*) como interpolador ($n = 4$). Esse processo resultou em uma tabela, a qual foi exportada do SAGA-GIS pela ferramenta *export table*. Estes dados compuseram o conjunto de variáveis topográficas.

Tabela 1 - Variáveis topográficas derivadas do MDE

Abrev	Variável	em inglês	Unidade
ELEV	Elevação	Elevation	metro
AH	Análise de sombreamento	Analytical Hillshading	radianos
SL	Declividade	Slope	radianos/porcentagem
ASP	Aspecto	Aspect	radianos
CIN	Índice de convergência	Convergence Index	porcentagem
CA	Área de contribuição	Catchment Area	metro ²
TWI	Índice de umidade topográfica	Topographic Wetness Index	adimensional
LS	Fator LS	LS Factor	adimensional
CNBL	Nível base da drenagem	Channel Network Base Level	metro
VD	Profundidade do vale	Valley depth	metro
GC	Curvatura geral	General curvature	metro
PC	Curvatura de perfil	Profile Curvature	metro
CSC	Curvatura transversal	Cross-Sectional Curvature	metro
TRI	Índice de rugosidade	Terrain ruggedness index	metro
VDCN	Distância vertical da drenagem	Vertical distance to channel network	metro
TI	Insolação total	Total insolation	KWh.m ⁻²
DDR	Razão direta difusa	Direct to diffuse ratio	adimensional
DUI	Duração da insolação	Duration of insolation	horas

Fonte: Autor.

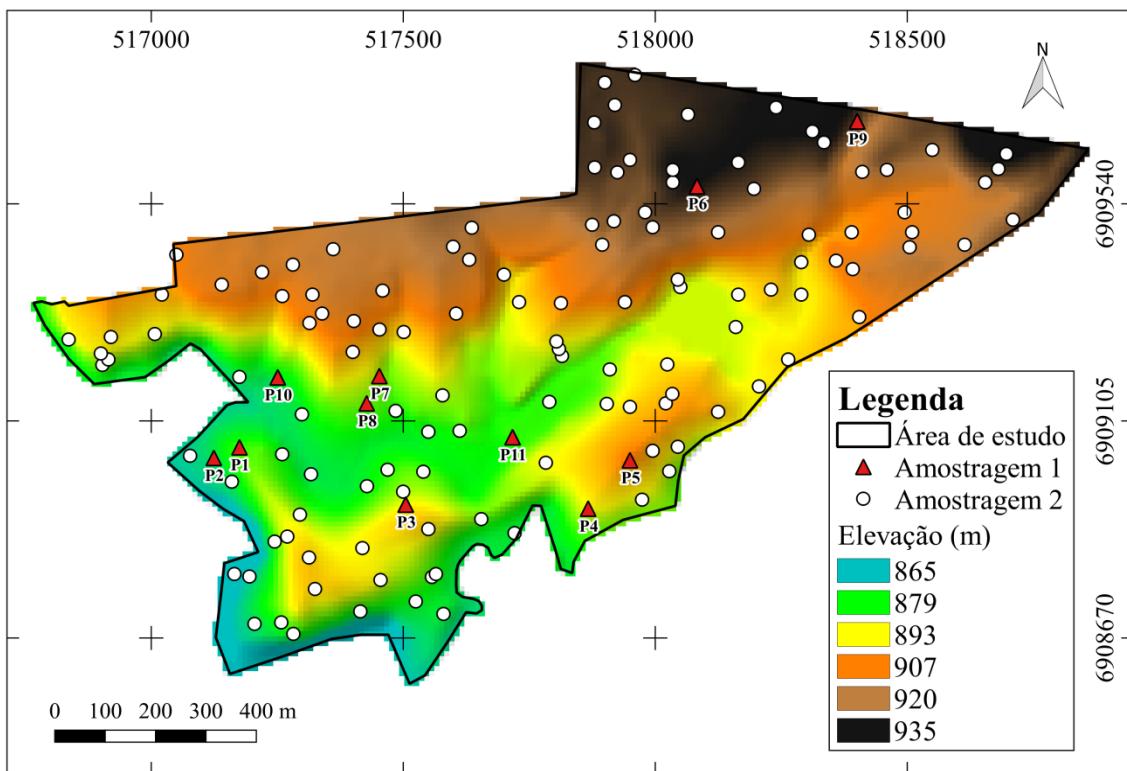
4.2.2. Obtenção das variáveis pedológicas

A amostragem do solo foi realizada em duas etapas. A primeira delas (amostragem 1) foi a descrição morfológica e coleta de amostras de 11 perfis de solo (Figura 6), conforme Santos et al. (2015). Devido à complexidade topográfica da área e da ausência de informações a respeito da relação do solo e das variáveis ambientais, os perfis foram selecionados intencionalmente com base no conhecimento pedológico/especialista. Dessa forma, o principal critério utilizado foi à necessidade de representar a relação solo-paisagem da área.

Em cada horizonte pedogenético foram coletadas amostras para caracterização química e granulométrica. Além disso, foram coletadas cinco amostras indeformadas, por meio de cilindros metálicos com 0,03 m de altura e 0,05 m de diâmetro para determinação da densidade do solo (DS), microporosidade (MI), macroporosidade (MA), porosidade total (Pt) e condutividade hidráulica

saturada (Ks). O perfil 11, classificado como Gleissolo Melânico, teve a coleta de amostras prejudicada devido às más condições de drenagem e, por estar localizado na paisagem em áreas não produtivas, foi utilizado apenas para caracterização da área e desconsiderado nas análises estatísticas. Os solos foram classificados conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (SANTOS et al., 2013).

Figura 6 - Modelo digital de elevação e distribuição dos pontos de amostragem 1 e 2



Fonte: Autor.

Na segunda etapa de amostragem (amostragem 2) foi definida uma malha contendo 125 pontos para coleta de dados dendrométricos e pedológicos (Figura 6). Visando a alocação desses pontos em relação a distribuição da variabilidade da paisagem, os mesmos foram selecionados pelo algoritmo Hipercubo Latino Condicionado (*Conditioned Latin Hipercube Sampling - cLHS*) com 10000 iterações. Esse método proposto por Minasny; McBratney (2006), propõe a estratificação da amostragem utilizando dados auxiliares e criando condicionantes para alocação dos pontos. Esta metodologia tem demonstrado superioridade em relação a outras amostragens para contemplar a variação da paisagem (MINASNY; MCBRATNEY, 2006; CARVALHO-JUNIOR et al., 2014).

Para selecionar os fatores condicionantes dessa amostragem 2 foi realizada uma análise prévia das variáveis topográficas da área. Foram consideradas condicionantes as variáveis do terreno, listadas no item anterior, que apresentaram maior contribuição na variância dos dados, identificada através da Análise de Componentes Principais (ACP). Assim, estabeleceram-se como condicionantes as variáveis: ELEV, VD, TWI, CNBL e DECLI as quais, juntas, explicaram aproximadamente 86 % da variância topográfica. O algoritmo de amostragem foi utilizado através da função `clhs()` implementado no pacote `clhs` no ambiente R (R CORE TEAM, 2017).

Em cada ponto foram coletadas amostras nas camadas de 0–20, 20–40, 40–60, 60–100 cm, mensuradas as variáveis morfológicas profundidade do solum (PS) e a espessura do horizonte A (EA). Considerou-se PS à espessura máxima do solo onde as raízes podem se desenvolver sem impedimentos físicos para penetração livre, facilitando a fixação da planta e a absorção de água e nutrientes. Os fatores limitantes considerados foram o lençol freático elevado e o contato com rocha consolidada (contato lítico) com ou sem fissuras. A interpretação da profundidade do solum foi realizada com uma adaptação do proposto por Lepsch et al. (2015) e considerou-se o solo como muito raso (< 25 cm), raso ($> 25 < 50$ cm), moderadamente profundo ($> 50 < 90$ cm), profundo ($> 90 < 100$ cm), limitando a máxima profundidade a 100 cm, devido ao comprimento do trado utilizado para a medição. Considerou-se EA à medida da superfície do solo até o início do horizonte B.

4.2.2.1.1. Análise Laboratorial

As amostras deformadas oriundas dos perfis foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com malha de 2 mm e submetidas à análises físicas e químicas em triplicata em laboratório para determinação das seguintes variáveis químicas: pH do solo em água; teores de Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) por espectroscopia de absorção atômica após extração com KCl 1,0 mol L⁻¹; potássio trocável (K) extraído com solução de HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,025 mol L⁻¹ e seu teor determinado por fotometria de chama; fósforo trocável (P), extraído em solução Mehlich-1 e determinado por espectrofotometria; acidez potencial (H+ Al⁺³) em extrato de Ca (OAC) 1,0 mol L⁻¹ a pH 7,0 e titulado com NaOH 0,0606 mol L⁻¹; e alumínio trocável (Al⁺³) extraído com solução de KCl 1,0 mol L⁻¹ e titulado com NaOH 0,025 mol L⁻¹. Todas essas análises seguiram metodologia preconizada por Donagema et al. (2011).

A composição granulométrica foi quantificada pelo método da pipeta, com dispersante químico NaOH 1 mol L⁻¹ e agitação mecânica de quatro horas (DONAGEMA et al., 2011). Naquelas amostras contendo teor de MOS superior a 5%, foi realizada a remoção com peróxido de hidrogênio (H₂O₂) (30 % v/v) precedeu a análise granulométrica. Assim, foram determinados os teores de argila (< 0,002 mm), silte (0,05 - 0,002 mm) e areia (0,02 - 0,05 mm).

A primeira etapa para a análise das amostras indeformadas foi retirar o solo excedente ao volume do cilindro metálico e saturar o solo por capilaridade por aproximadamente 24 h. Os cilindros saturados foram submetidos à carga hidráulica para a determinação da K_s, obtida com o uso do permeâmetro de carga constante (DONAGEMA et al., 2011). A média de três leituras foi considerada como valor K_s de cada cilindro, as quais compuseram, através da média dos cinco cilindros, um único valor para representar a K_s de cada horizonte.

As amostras foram novamente saturadas, pesadas e submetidas às tensões de 100 hPa em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006). Após atingir equilíbrio de umidade em cada uma das tensões, as amostras foram pesadas para a determinação do seu conteúdo volumétrico de água (θ). Foram determinados os valores de densidade de partícula, porosidade total (P_t), microporosidade (M_i) e macroporosidade (M_a). Depois de pesadas na tensão de 100 hPa, as amostras foram submetidas à secagem a 105°C por aproximadamente 48 h, para determinação da densidade do solo (DS) (DONAGEMA et al., 2011).

Com o intuito de racionalizar os recursos e direcionar as análises com base em resultados preliminares, obtidos pelas análises físicas e químicas dos perfis, as amostras provenientes da amostragem 2 foram submetidas apenas à análise granulométrica.

4.2.3. Obtenção das variáveis dendrométricas

Em cada ponto da amostragem 2 foram mensuradas as variáveis dendrométricas das quatro árvores mais próximas, salvo as áreas de APP. Assim, foram obtidos os valores de circunferência na altura do peito (CAP) com auxílio de fita métrica e altura da árvore (h) com auxílio do equipamento Vertex. Os valores de CAP foram convertidos para diâmetro (DAP) (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997).

Considerando que a leitura das alturas é uma estimativa da altura real, foram realizadas em torno de 16 leituras em cada árvore para composição da média individual, sendo consideradas

repetições somentes aquelas leituras cujo desvio padrão não ultrapassou 0,5 metros. A média de h e CAP das quatro árvores foram utilizadas para representar o ponto.

4.3. ANÁLISE DOS DADOS

Terminado o passo de obtenção das variáveis químicas, físicas, morfológicas e dendrométricas, foram compostos dois conjuntos de dados. O primeiro, doravante chamado de conjunto 1, contemplou as informações químicas, físicas, morfológicas, topográficas e dendrométricas dos perfis, resultante da amostragem 1. O segundo, doravante chamado de conjunto 2, contemplou as informações granulométricas, morfológicas, topográficas e dendrométricas, resultante da amostragem 2. Ambos foram importados para o ambiente R (R CORE TEAM, 2017) para a realização de todas as análises estatísticas.

A estatística descritiva das informações foi realizada através da função `describe()`, implementada no pacote **psych**. Para as variáveis físicas e químicas do conjunto 1 foram considerados os valores ponderados de cada perfil. Foi testada e negada a hipótese de normalidade dos dados, utilizando o teste de Shapiro-Wilk através do comando `shapiro.test()` do pacote **stats**. A homogeneidade das variâncias foi testada e aceita através do teste de esfericidade de Bartlett, comando `bartlett.test()` implementado no pacote **stats**. Por fim, testou-se a adequação amostral dos dados através do teste KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) com o comando `KMO()` implementado no pacote **psych**. As técnicas estatísticas utilizadas estão descritas em Hair et al. (2009).

A avaliação da relação existente entre as variáveis foi realizada em duas etapas. Em um primeiro momento, foi realizada uma matriz de correlação linear dos dados do conjunto 1, em que as variáveis morfológicas, físicas e químicas do solo junto com as variáveis topográficas foram correlacionadas com as variáveis dendrométricas. O segundo passo foi realizar uma segunda matriz de correlação utilizando os dados do conjunto 2, a fim de confirmar se essas relações se mantinham com o aumento do conjunto amostral.

Devido aos dados apresentarem uma distribuição não paramétrica, o método utilizado para análise de correlação foi o Spearman, que não pressupõe a normalidade dos dados. Para isso, foi utilizado com o comando `cor(method="spearman")` implementado no pacote **stats**. Nessa técnica, as variáveis são padronizadas e o coeficiente de correlação (*r*) resultante varia de -1,00 a

+ 1,00. A interpretação dos resultados baseou-se na identificação de valores mais distantes de zero, portanto com maior relacionamento linear.

A classificação textural das amostras do conjunto 2 foi realizada utilizando o comando `TT.plot()` implementado no pacote **soiltexture**. O perfil de elevação foi gerado a partir das cotas de elevação oriundas do MDE e dados de campo, a partir da ferramenta *terrain analysis* do QGIS, com edição no software Inkscape.

4.3.1. Construção e avaliação das FPS

Após as duas etapas de análise dos dados, foram selecionadas as variáveis com maior correlação com as variáveis dendrométricas para construção das FPS. Assim, foram construídas as FPS para a PS e EA utilizados dois métodos multivariados: a regressão linear múltipla (MLR) utilizando o comando `lmStepAIC()` implementado no pacote **caret** e o random forest (RF) utilizando o comando `rf()` implementado no pacote **randomForest**, com número padrão de preditores a serem selecionados em cada nó (`mtry = padrão`) e 1000 árvores (`ntrees = 1000`), utilizando como preditoras as variáveis topográficas oriundas do MDE (conjunto A).

Considerando que na literatura as características do terreno são consideradas o principal fator preditivo utilizado na determinação da profundidade do solo (MICHEL & KOBIYAMA (2015a), as variáveis topográficas foram utilizadas como variáveis preditoras da PS e EA (conjunto A). Além disso, a fim de testar a relação entre a altura das árvores com a dinâmica da paisagem, foi construído um segundo conjunto de variáveis preditoras, considerando as variáveis topográficas e a altura das árvores (conjunto B).

Para gerar as FPS, a amostragem 2 ($n = 102$) foi particionada aleatoriamente em dois conjuntos de dados. O primeiro, conjunto de calibração da FPS, composto por 70 % das amostras e outro de validação com 30 % das amostras. Avaliação da qualidade das FPS foi realizada a partir das seguintes estatísticas: coeficiente de determinação (R^2) (Equação 3) e raiz quadrada média do erro de previsão (RMSE) (Equação 4):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (4)$$

onde: \hat{y} = valor predito; \bar{y} = valor médio observado; y = valores observados; n = número de amostras com $i = 1, 2, \dots, n$.

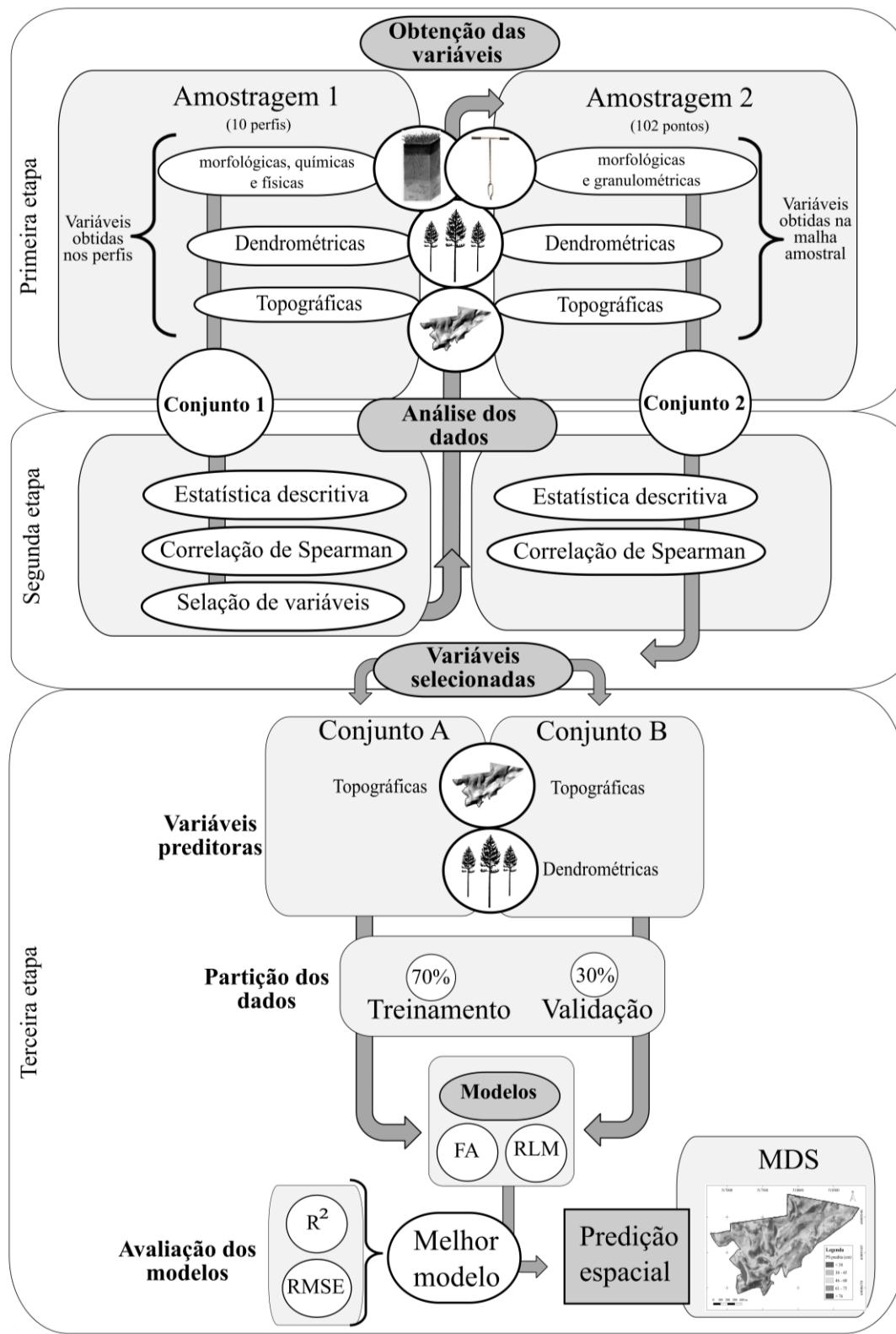
4.3.2. Predição espacial

Com base nos melhores resultados de predição para PS e EA foi realizada a predição espacial. Como não há um PI da h de todos os pixels da paisagem, a geração dos mapas contemplou apenas os melhores desempenhos do conjunto A.

Além das metodologias já apresentadas, testou-se uma abordagem paramétrica a partir da transformação dos dados via boxcox, a redução da multicolinearidade dos conjuntos preditores pela ACP e a estratificação dos pontos da amostragem 2 baseado em “solos rasos” e “solos profundos”. Porém, por terem sido malsucedidas estas abordagens não serão discutidas.

Na figura 7 consta um fluxograma geral da metodologia empregada.

Figura 7 - Fluxograma geral da metodologia



Fonte: Autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO CONJUNTO 1

Os perfis de solo descritos foram classificados como Neossolos Litólicos, Neossolos Regolíticos, Cambissolos Háplicos, Cambissolos Húmicos, Latossolos Vermelho-Amarelos e Gleissolos Melânicos, as quais representam a topossequência da área de estudo (Tabela 2). A descrição morfológica e os dados analíticos de cada perfil constam no apêndice 1.

Tabela 2 - Composição de classes taxonômicas identificadas no conjunto 1

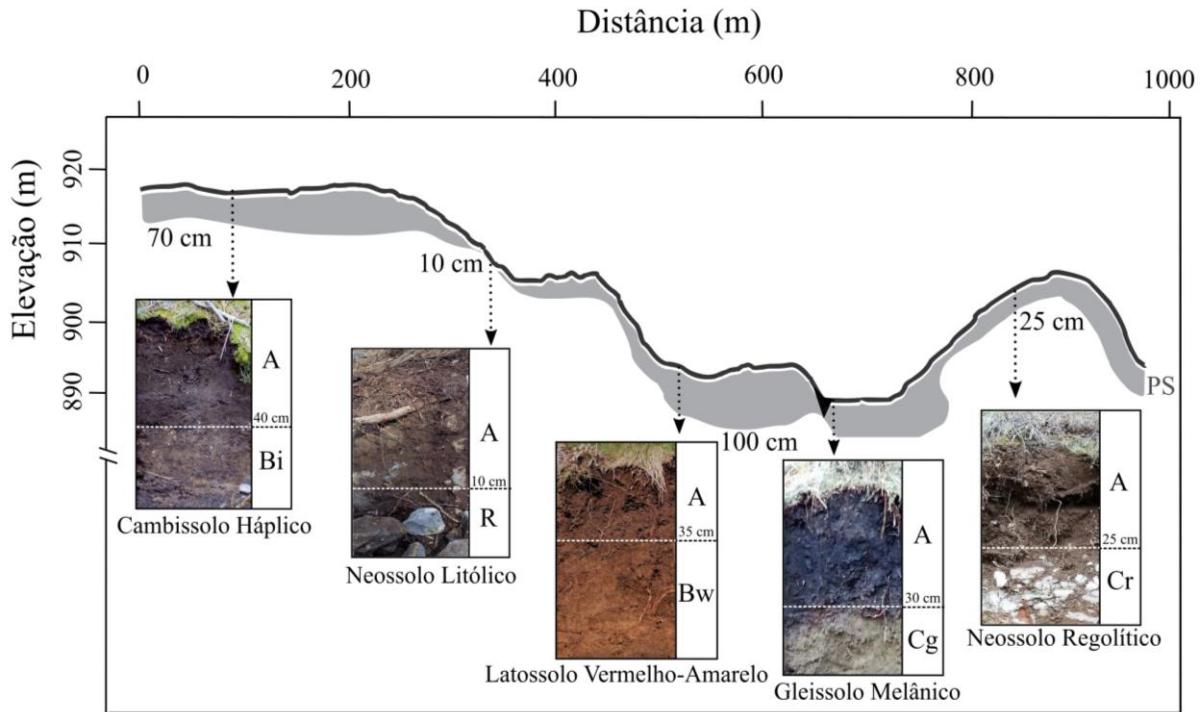
Classes taxonômicas	Número de perfis
Neossolo Litólito Distroúmbrico fragmentário	2
Neossolo Regolítico Distroúmbrico típico	1
Cambissolo Háplico Alumínico úmbrico	2
Cambissolo Háplico Alumínico típico	1
Cambissolo Húmico Aluminoférreo latossólico	1
Latossolo Vermelho-Amarelo Alumínico típico	3
Gleissolo Melânico Alumínico típico*	1
Total	11

Fonte: Autor.

*dados não incluídos nas análises estatísticas.

Conforme as tendências observadas, em locais de relevo plano ou suavemente ondulado com boa drenagem, foram identificados solos profundos com sequência de horizontes A-Bw (Latossolos) e, em condições de má drenagem, a ocorrência de solo com a sequência de horizonte A-Cg (Gleissolos) (Figura 8). Nos relevos ondulados ou fortemente ondulados, observaram-se solos com a sequência de horizontes A-R ou A-Bi (Neossolos e Cambissolos). Especialmente em condições de relevo forte ondulado predominam os Neossolos Litólicos.

Figura 8 - Topossequência de solos representativos da área de estudo



Fonte: Autor.

Em que: PS: profundidade do solum.

5.1.1. Caracterização das variáveis morfológicas do solo

Na paisagem, os Neossolos estão localizados em altitudes que variam de 886 e 909 m, em relevo ondulado à forte ondulado, com declividades superiores a 13% (Tabela 3). Nessas condições, o gradiente topográfico diminui as taxas de infiltração em detrimento do escoamento superficial, acelera o processo erosivo e provoca uma constante remoção dos horizontes superficiais do solo, levando estes solos a um constante rejuvenescimento por erosão (CHAGAS et al., 2010; STRECK et al., 2008). Nesse caso, as feições geomorfológicas passam a limitar, impedir ou retardar o desenvolvimento do solo (BRADY; WEIL, 2013). Como consequência, nessas áreas, foram descritos solos rasos com PS média de 28 cm, mediana de 15 cm e horizonte superficial cerca de 50% menor que as demais classes (Tabela 3).

O elevado desvio padrão da PS dos Neossolos decorre da presença de um Neossolo Regolítico (RR) entre dois Neossolos Litólicos (RL). Enquanto os RL apresentam contato lítico dentro de 50 cm da superfície, nos RR o contato lítico ocorre a uma profundidade maior que 50

cm, admitindo já um horizonte B incipiente com menos de 10 cm de espessura (SANTOS et al., 2013). De fato, o intervalo superior de PS dessa Ordem diz respeito a um RR, com 60 cm, o que faz com que a média seja afetada, apareça superior a mediana e determine um valor de dispersão de dados maior.

Tabela 3 - Estatística descritiva do conjunto 1 por classe de solo

Classe	n	Média	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo
Profundidade solum (cm)						
Neossolo	3	28	28	15	10	60
Cambissolo	4	112	26	105	90	150
Latossolo	3	150	10	150	140	160
Gleissolo	1	60	0	60	60	60
Espessura do horizonte A (cm)						
Neossolo	3	16	6	15	10	22
Cambissolo	4	42	13	37	33	60
Latossolo	3	35	5	37	30	39
Gleissolo	1	32	0	32	32	32
Elevação (m)						
Neossolo	3	897	11	897	886	909
Cambissolo	4	901	17	895	887	925
Latossolo	3	903	25	892	886	931
Gleissolo	1	881	0	881	881	881
Declividade (%)						
Neossolo	3	14	1	13	13	15
Cambissolo	4	16	7	16	8	24
Latossolo	3	8	2	7	7	10
Gleissolo	1	1	0	1	1	1

Fonte: Autor.

Os Cambissolos foram identificados em encostas predominantemente convexas, distribuídos tanto em relevo suave onulado (declividade mínima = 8 %), quanto em relevo forte onulado (declividade máxima = 24 %) (Tabela 3 e Figura 8). Apesar de ocupar posições de relevo parecidas com os Neossolos, os Cambissolos diferenciam-se por apresentar um desenvolvimento pedogenético incipiente, com formação de um horizonte subsuperficial Bi, no entanto sem características pedogenéticas bem definidas (SANTOS et al., 2013). Em decorrência da ampla

distribuição dos Cambissolos na paisagem, foram descritos solos moderadamente profundos (90 cm) a profundos (150 cm) (Tabela 3). Segundo POTTER et al. (2004), em SC, de um modo geral, essa amplitude é ainda maior, sendo comum a ocorrência de Cambissolos com perfis rasos (< 50 cm) ou muito profundos (> 200 cm).

Em relação à EA dos Cambissolos, a média e mediana apresentaram valores de 42 e 33 cm respectivamente, com amplitude de valores entre de 33 a 60 cm (Tabela 3). Esse valor máximo foi identificado em um solo classificado no segundo nível como Cambissolo Húmico (CH). Nesse caso, a EA é consequência das condições microclimáticas mais úmidas, que favorecem o acúmulo de matéria orgânica em superfície. O horizonte A destes solos passa a apresentar uma espessura maior, geral entre 50 e 70 cm em decorrência do acúmulo de material orgânico (POTTER et al., 2004).

Na área de estudo os Latossolos estão entre 892 e 931 m de elevação, em declividade mediana de 7 % o que possibilita um desenvolvimento pedogenético maior do perfil, expresso principalmente pela PS superior a 140 cm (Tabela 3 e Figura 8). Corroborando, o levantamento de solos de SC (POTTER et al., 2004) apresenta os Latossolos em declives entre 3 e 8 %, fase de relevo suave onulado, quase sempre em altitudes superiores a 900 metros. Apresentam elevado grau de intemperismo e diferenciam-se dos Cambissolos pelo fato de exibirem maior desenvolvimento pedogenético, refletindo na presença de uma menor percentagem de minerais primários (< 4 %) e na atividade da argila baixa (< 17 cmol_c kg⁻¹). Essas características são efeito do processo de formação desses solos, a latolização, marcada principalmente pela lixiviação intensa e consequente perda de material silicatado (SANTOS et al., 2013).

O Gleissolo descrito está localizado em uma área de relevo plano, fechado, que dificulta o movimento vertical e lateral de água e sedimentos, conferindo uma condição de má drenagem ao solo. É um solo moderadamente profundo (60 cm) com horizonte superficial de 32 cm (Tabela 3 e Figura 8), concentrados predominantemente em APPs. De modo geral são solos pouco desenvolvidos, caracterizados pelo forte processo de gleização, em decorrência do regime de umidade redutor que se processa em meio anaeróbico, com deficiência ou ausência de oxigênio permanente ou intermitente, marcado também pelo acúmulo de material orgânico vindo de áreas adjacentes e da redução da velocidade de decomposição de resíduos pelo hidromorfismo (SANTOS et al., 2013).

5.1.2. Caracterização das variáveis químicas do solo

Além de condicionar diferentes processos de desenvolvimento do solo, a posição na paisagem também influencia na variabilidade dos aspectos químicos e físicos desses solos. Assim, ao longo do gradiente topográfico a fertilidade do solo geralmente aumenta em direção a cotas menores e a acidez aumenta, decorrente do transporte de material das partes altas para as mais baixas (BOTREL et al., 2002). Em relação à acidez, todos os perfis descritos apresentaram pH muito baixo, entre 4,6 e 4,8, com tendência de aumento em função da profundidade (Tabela 4). De acordo com as tabelas de interpretação propostas pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo dos Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (SBCS, 2016), não há um pH de referência ou pH adequado para o desenvolvimento da espécie. Dessa forma é possível observar florestas de pinus se desenvolvendo em condições mais ácidas, como Barbosa et al. (2012) que encontraram pH entre 4,27 a 4,46 em uma floresta de 12 anos e Rigatto et al. (2005) que observaram valores de pH entre 3,8 a 4,1.

Conforme o esperado, os horizontes superficiais das classes de solo apresentam maiores concentrações de MO, variando de 4,3; 4,6 e 4,2 para Neossolo, Cambissolo e Latossolo respectivamente (Tabela 4). Os horizontes subsuperficiais normalmente tendem conter menos MO que os superficiais, e nesse caso, a diferença entre o teor de MO dos horizontes superficiais e subsuperficiais passou de 30 %.

Em relação ao conteúdo de MO do horizonte A dos Cambissolos, nota-se um elevado desvio padrão em relação à média. Esse desvio é reflexo, mais uma vez, da presença de um Cambissolo com horizonte “A húmico” com elevado acúmulo de MO na camada superficial, responsável pelo valor extremo do conjunto de dados (7,8 %) (Tabela 4). Ao interpretar estes dados é possível observar que o valor médio de MO é afetado pelo valor extremo, perdendo o sentido prático e a capacidade de representar a distribuição que a originou. Nestes casos, a mediana (3,7 %) é considerada um parâmetro mais robusto para representar a medida de posição central. Esse horizonte “A húmico”, rico em MO, ocorre em virtude das condições microclimáticas mais úmidas, em que o perfil se encontra com excesso de água (deficiência de oxigenação), forçando os microrganismos a uma decomposição mais lenta que em locais bem aerados. Nesse contexto, a adição de material orgânico passa a ser maior que a perda por decomposição, ocasionando o acúmulo de MO em superfície.

Tabela 4 - Estatística descritiva dos dados químicos do conjunto 1

Classe	Horizonte	n	Média	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo
pH							
Neossolo	A	3	4,8	0,1	4,8	4,7	4,8
Cambissolo	A	4	4,7	0,2	4,7	4,5	4,9
	B	4	4,8	0,1	4,8	4,7	4,9
Latossolo	A	3	4,6	0,1	4,7	4,5	4,7
	B	3	4,8	0,1	4,8	4,7	4,8
P assimilável (mg L^{-1})							
Neossolo	A	3	4,1	0,6	3,8	3,7	4,7
Cambissolo	A	4	2,5	0,7	2,4	1,7	3,5
	B	4	1,3	0,6	1,3	0,6	1,9
Latossolo	A	3	3,1	0,3	3,0	2,9	3,4
	B	3	1,3	0,6	1,3	0,8	1,9
MO (%)							
Neossolo	A	3	4,3	0,8	3,8	3,8	5,2
Cambissolo	A	4	4,6	2,2	3,7	3,0	7,8
	B	4	1,9	0,1	1,9	1,8	2,0
Latossolo	A	3	4,2	0,3	4,3	3,9	4,5
	B	3	1,3	0,1	1,3	1,3	1,4
SB (cmolc kg^{-1})							
Neossolo	A	3	5,2	1,8	5,9	3,2	6,5
Cambissolo	A	4	2,5	2,0	2,2	0,7	4,8
	B	4	1,2	0,9	1,6	0,3	2,4
Latossolo	A	3	3,1	1,1	2,8	2,2	4,3
	B	3	0,7	0,2	0,7	0,6	0,9
CTC _{pH7} (cmolc kg^{-1})							
Neossolo	A	3	18,3	1,0	17,8	17,6	19,4
Cambissolo	A	4	15,7	3,3	15,2	12,2	20,1
	B	4	10,2	0,5	10,1	9,8	10,8
Latossolo	A	3	13,9	2,7	14,6	10,9	16,1
	B	3	7,3	1,9	6,6	5,9	9,4
m (%)							
Neossolo	A	3	53	13	48	43	67
Cambissolo	A	4	68	21	67	49	91
	B	4	82	10	82	70	95
Latossolo	A	3	70	7	67	65	78
	B	3	86	5	86	81	90

Fonte: Autor.

Em que MO: matéria orgânica, SB: soma de bases, CTC: capacidade de troca de cátion e m: saturação por alumínio.

Os teores de fósforo (P) são considerados muito baixos e baixos conforme SBCS (2016), com teores de $1,3 \text{ mg L}^{-1}$ no horizonte B da classe dos Latossolos e $3,9 \text{ mg L}^{-1}$ no horizonte A da

classe dos Cambissolos. O acúmulo de P na superfície dos solos, especialmente dos CH conforme já discutido anteriormente, é resultado do intenso processo biogeoquímico atuante na superfície, sobretudo por se tratar de uma floresta com elevada capacidade de deposição de resíduos. Brady; Weil (2013) comentam que a alta concentração de óxidos de ferro e alumínio dá aos solos uma capacidade de fixação de ânions tão forte que o P passa a ser pouco disponível na solução do solo, reflexo do processo intemperismo o que faz com que o teor de P passe a ser menor nos horizontes subsuperficiais dos Latossolos e Cambissolos (Tabela 4), além da ciclagem de nutrientes em superfície, importante via de disponibilização de P.

Em relação à SB, nota-se que ela diminui consideravelmente conforme aumenta o grau de desenvolvimento do solo, sendo $5,2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ nos Neossolos e $0,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ no horizonte B dos Latossolos (Tabela 4). No decorrer do desenvolvimento do solo na paisagem, é natural ocorrer à diminuição da SB. Somado a isso, a baixa atividade da argila, especificamente no horizonte B dos Latossolos, limita a capacidade de manter cátions adsorvidos, o que justifica essa diferença em relação a SB entre horizontes e classes de solo.

Conforme o esperado, os valores de CTC são de médio a altos (SBCS, 2016) com maiores valores na parte superficial dos solos (horizonte A), dada a contribuição da MO nessa propriedade. A CTC apresentou-se maior na classe Neossolo ($18,3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e menor no horizonte B dos Latossolos ($7,3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Porém, é possível observar que grande parte da CTC destes solos está ocupada por cátions potencialmente tóxicos como o Al^{3+} , dados os valores de m %. Os resultados mostram valores muito altos de m %, superiores a 50 % em todos os horizontes pedogenéticos analisados, passando de 53 % nos Neossolos até 86 % no horizonte de máxima expressão genética dos Latossolos (Tabela 4).

Apesar dos valores de m % serem muito altos, um maior acúmulo de MO reflete em um menor efeito fitotóxico do Al^{3+} devido à alta afinidade por compostos orgânicos, que faz com que o Al^{3+} seja complexado, e se torne não disponível para a absorção pelas raízes, não acarretando em danos para as culturas mesmo em baixos valores de pH (TIECHER et al., 2016). De modo geral, nota-se que além de apresentar um quadro nutricional bastante variável no espaço, os solos são pobres em termos de disponibilidade de nutrientes para as plantas.

5.1.3. Caracterização das variáveis físicas do solo

Em relação ao comportamento físico, nenhuma das classes de solo apresentou mudança textural entre horizontes (Tabela 5), com teor de argila crescente conforme o grau de desenvolvimento das classes. Os Neossolos apresentaram teor médio de areia de 127 g kg⁻¹, variando entre 114 e 148 g kg⁻¹ enquanto o horizonte B dos Latossolos apresentou média de 55 g kg⁻¹ na amplitude de 44 e 63 g kg⁻¹. A granulometria, juntamente com o grau de estruturação do solo, influenciou nas demais características físicas como densidade do solo, porosidade e condutividade hidráulica.

A Ds mostra-se inferior nas camadas superficiais do solo, estando entre 0,79; 0,88 e 0,93 g cm⁻³ nos Neossolos, Cambissolos e Latossolos, respectivamente. Nessas camadas, a participação da MO assume papel fundamental na cimentação e agregação dos solos (TISDALL; OADES, 1982). A estrutura formada em situações de elevados teores de MO, predominantemente granular do tipo grumosa, é caracterizada pela elevada porosidade dentro e entre os agregados formados, que, por via de consequência determina valores mais baixos de Ds (FERREIRA, 2010). Por isso, comparativamente, as camadas mais subsuperficiais, com menores teores de MO, apresentam Ds média maior, chegando a Cambissolos (1,18 g cm⁻³) e nos Latossolos (1,25 g cm⁻³). Apesar de a Ds associar-se com a dinâmica de água no solo, a forma com que partículas do solo estão arranjadas é que determina a quantidade e natureza dos poros existentes. Ao observar as diferenças de Pt entre os horizontes e as classes de solo apresentadas, fica evidente a influência da textura, Ds e MO no arranjo das partículas. Logo, os horizontes superficiais apresentam uma quantidade maior de Pt, e à medida que se atinge maiores profundidades a Ds aumenta, e a frequência de Mi aumenta em detrimento de Ma (Tabela 5).

A Pt variou de 0,59 a 0,66 cm³ cm⁻³ conforme a classe de solo, valor superior ao encontrado por Morales et al. (2010) e Bognola et al. (2010) em floresta de pinus de 6 e 12 anos, respectivamente. Estes mesmos autores utilizaram o valor de referência de 0,10 cm³ cm⁻³ de macroporos como limites mínimos para uma boa aeração. Utilizando este mesmo critério, constata-se a aeração adequada em todas as classes de solo, considerando como Ma a diferença entre Pt e Mi (Tabela 5).

Tabela 5 - Estatística descritiva dos dados físicos do conjunto 1

Classe	Horizonte	n	Média	Desvio padrão	Mediana	Mínimo	Máximo
--------	-----------	---	-------	---------------	---------	--------	--------

		Areia (g kg^{-1})					
Neossolo	A	3	127	18	120	114	148
Cambissolo	A	4	94	13	92	81	112
	B	4	85	18	88	63	101
		Argila (g kg^{-1})					
Neossolo	A	3	560	18	565	540	573
Cambissolo	A	4	632	43	637	585	668
	B	4	624	80	89	546	715
		Latossolo					
Neossolo	A	3	75	18	75	57	94
	B	3	55	10	60	44	62
		Ds (g cm^{-3})					
Neossolo	A	3	0,79	0,08	0,76	0,74	0,88
Cambissolo	A	4	0,88	0,15	0,90	0,70	1,00
	B	4	1,18	0,12	1,08	1,10	1,34
		Latossolo					
Neossolo	A	3	0,93	0,06	0,90	0,90	1,00
	B	3	1,25	0,12	1,01	1,00	1,31
		Pt ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)					
Neossolo	A	3	0,66	0,04	0,67	0,62	0,69
Cambissolo	A	4	0,65	0,06	0,65	0,60	0,70
	B	4	0,59	0,03	0,59	0,57	0,63
		Latossolo					
Neossolo	A	3	0,63	0,06	0,60	0,60	0,70
	B	3	0,59	0,01	0,60	0,58	0,60
		Mi ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)*					
Neossolo	A	3	0,46	0,05	0,47	0,41	0,50
Cambissolo	A	4	0,50	0,08	0,50	0,40	0,60
	B	4	0,46	0,04	0,45	0,43	0,53
		Latossolo					
Neossolo	A	3	0,50	0,00	0,50	0,50	0,50
	B	3	0,47	0,06	0,50	0,40	0,50
		Ks (mm h^{-1})					
Neossolo	A	3	716,8	493,1	548,3	330,0	1272,0
Cambissolo	A	4	276,9	201,7	258,0	50,5	541,3
	B	4	250,2	178,8	196,5	53,1	409,8
		Latossolo					
Neossolo	A	3	299,1	37,2	311,2	257,4	328,8
	B	3	168,4	107,7	207,3	46,6	251,2

Fonte: Autor.

Em que: Ds = densidade do solo, Pt = porosidade total, Mi = microporosidade e Ks = condutividade hidráulica de solo saturado. *Os valores de macroporosidade são tomados como o produto da diferença de Pt e Mi.

O reflexo da estrutura do solo em relação à água pode ser observado nos valores de Ks. Os Neossolos apresentam uma Ks de $716,8 \text{ mm h}^{-1}$, com desvio padrão elevado por conta dos intervalos máximo ($1272,0 \text{ mm h}^{-1}$) e mínimo ($330,0 \text{ mm h}^{-1}$), já nos Cambissolos e Latossolos esse valor médio cai para $276,9$ e $299,1 \text{ mm h}^{-1}$, respectivamente. Considerando que os Neossolos possuem uma profundidade do solum reduzida (Tabela 2), a Ks elevada facilita a saída de água do sistema e limita ainda mais a capacidade de armazenamento de água para as plantas nesses solos.

Nos horizontes B, a K_s diminui consideravelmente, chegando à média de 168,4 mm h⁻¹ nos Latossolos, principalmente pela perda de continuidade dos poros, consequência da diminuição da atividade biológica em subsuperfície.

5.1.4. Caracterização das variáveis dendrométricas

A variabilidade de condições pedológicas discutidas é refletida na altura das árvores, sendo possível verificar visualmente um comportamento linear em relação à altura das árvores e o grau de desenvolvimento do solo (Tabela 6).

Tabela 6 Estatística descritiva das variáveis dendrométricas do conjunto 1

Classe	n	Média	Desvio padrão	Mediana	Mínimo	Máximo
h (m)						
Neossolo	3	29,7	1,1	30,2	28,4	30,4
Cambissolo	4	31,5	3,4	32,5	26,7	34,3
Latossolo	3	34,4	1,5	35,0	32,7	35,5
DAP (cm)						
Neossolo	3	50,0	10,4	45,0	43,1	62,0
Cambissolo	4	48,9	2,2	48,5	46,5	51,9
Latossolo	3	52,7	3,1	53,2	49,3	55,5

Fonte: Autor.

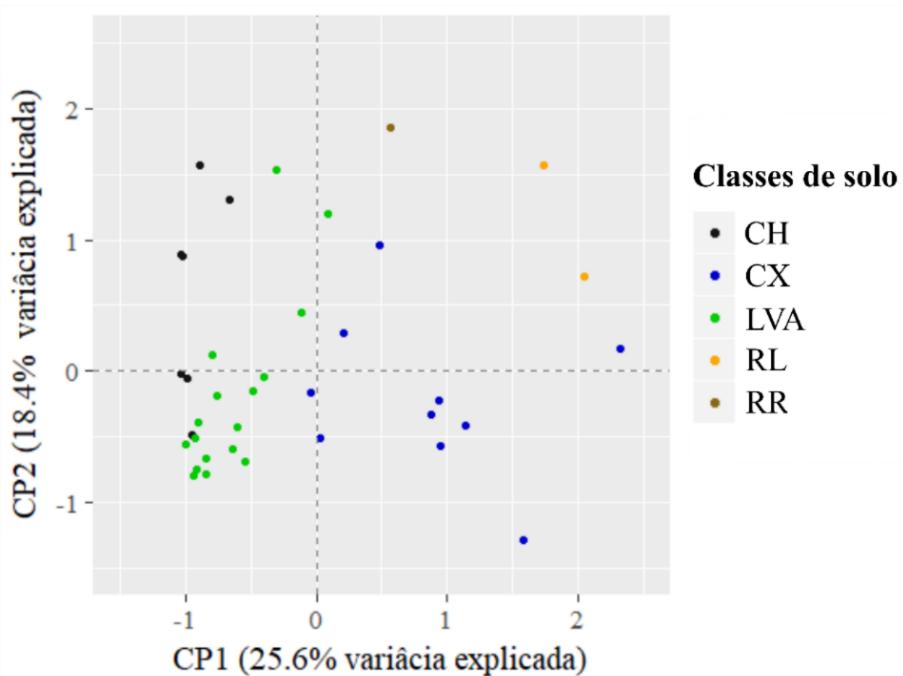
Em que n: número de perfis, h: altura da árvore e DAP: diâmetro a altura do peito.

Neossolos e Latossolos parecem apresentar condições divergentes no que diz respeito ao desenvolvimento do pinus. Enquanto na primeira classe a média de altura atinge 29,7 m, na segunda chega a 34,4 m. Cabe ressaltar ainda que em ambas o desvio padrão é baixo (1,1 e 1,5, respectivamente) e os valores médios são muito próximos à mediana. Já nos Cambissolos, foram encontradas árvores com altura intermediária (média = 31,5 m), com elevada dispersão de dados (desvio padrão = 3,4) (Tabela 6).

Esse comportamento distinto das árvores nas diferentes classes de solo é reflexo do conjunto de características que cada classe oferece ao desenvolvimento das plantas, conforme o demonstrado pelo biplot da ACP do conjunto 1 (Figura 9). Nota-se que as classes de solo RL, RR

e LVA aparecem em posições distintas do gráfico, ao passo que os CX e CH parecem não apresentar uma tendência específica. Esse comportamento resulta da elevada heterogeneidade da classe dos Cambissolos, tanto físicas e químicas, quanto morfológicas já discutidas. Bognola (2007) encontrou amplitudes próximas de variação de produtividade em Cambissolos e sugere que as variações de espessura do horizonte superficial “A” pode ser a causa da dissimilaridade na produtividade e no desenvolvimento das árvores.

Figura 9 - Primeira e segunda componente principal do conjunto 1



Fonte: Autor.

Em que: CH: Cambissolo Háplico, CX: Cambissolo Húmico, LVA: Latossolo Vermelho Amarelo, RL: Neossolos Litólico, RR: Neossolo Regolítico.

Os Latossolos apresentam os maiores valores de DAP, em média 52,7 cm, variando entre 49,3 e 55,5 cm. Ainda que os Neossolos apresentem um diâmetro médio maior que os Cambissolos (50,0 e 48,9 cm respectivamente), é notável a influência que os valores extremos causaram na média da primeira classe (máximo = 62,0 cm), observado também no elevado desvio padrão (10,4). Pode-se evitar interpretações errôneas observando os valores de mediana. Nesse caso o mesmo padrão de comportamento linear é facilmente identificado (45,0 cm em Neossolos, 48,5 em Cambissolos e 53,2 cm em Latossolos) (Tabela 6).

Diferenças significativas de produtividade com base na classe de solo foi apontada por Munhoz (2015) que observou maiores incrementos, volumes e IS em Latossolos Vermelhos e Cambissolos Háplicos, em detrimento de Argissolos. Em contrapartida, Dedecek et al. (2008), trabalhando com as mesmas ordens de solo, constatou diferença significativa apenas para DAP. Contudo Bognola (2007) não conseguiu explicar as variações de IS somente pela definição das classes, ainda que utilizando a classificação até o quarto nível categórico do SiBCS. Esse resultado pode ser consequência da ampla variação de propriedades do solo dentro de uma mesma classe. Logo, observa-se que a capacidade de identificar áreas mais produtivas utilizando a classificação do solo está diretamente relacionada com variabilidade pedológica da área em questão. Somado a isso, depende de os fatores limitantes para o desenvolvimento das plantas serem ou não características diferenciais ou covariantes dentro do sistema de classificação de solo utilizado.

5.2. CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO CONJUNTO 1

Os resultados mais significativos de correlação com às variáveis dendrométricas foram observadas com a variável morfológica PS e com a variável topográfica DECLI. A altura das árvores apresentou uma correlação linear significativa positivamente com a PS ($r = 0,71$) e negativamente com a declividade ($r = -0,89$) (Tabela 7). A relação da altura do pinus com a PS e declividade é facilmente compreendida, considerando que a declividade controla grande parte dos processos pedogenéticos (GALLANT; WILSON, 2000) e determina em parte a capacidade de armazenamento de água no solo, o potencial de erosão/deposição, e por consequência, o grau de desenvolvimento do solo (KAMPF; CURI, 2012), demonstrada pela relação inversa entre a declividade do terreno e a PS ($r = -0,74$) (Tabela 7).

Tabela 7 - Coeficientes de correlação de Spearman entre variáveis do conjunto 1

	PS	EA	SB	H+Al	CTC	m	P	MO	pH	Ds	Pt	Ma	Ks	AREIA	ARGILA	DAP	h	DECLI	ELEV
PS	1,00																		
EA	*0,62	1,00																	
SB	-0,22	*-0,39	1,00																
H+Al	-0,14	0,00	0,25	1,00															
CTC	*-0,35	-0,01	*0,60	*0,77	1,00														
m	0,15	*0,33	*-0,95	-0,10	*-0,50	1,00													
P	-0,18	-0,21	*0,59	*0,40	*0,54	*-0,56	1,00												
MO	-0,13	0,05	*0,58	*0,84	*0,90	*-0,45	*0,47	1,00											
pH	0,27	0,20	-0,30	-0,26	*-0,36	0,23	-0,22	*-0,31	1,00										
Ds	0,18	0,04	*-0,37	*-0,75	*-0,77	0,27	-0,29	*-0,75	0,15	1,00									
Pt	-0,16	-0,03	*0,42	*0,75	*0,80	*-0,32	*0,36	*0,78	-0,21	*-0,94	1,00								
Ma	*-0,43	*-0,52	*0,33	0,15	0,26	-0,25	0,24	0,14	*-0,55	*-0,36	*0,41	1,00							
Ks	*-0,52	*-0,50	*0,38	0,19	*0,36	*-0,32	0,28	0,20	*-0,42	*-0,40	*0,44	*0,83	1,00						
AREIA	*-0,33	0,12	*0,44	0,19	*0,56	*-0,44	*0,41	*0,41	-0,18	*-0,40	*0,39	0,17	*0,33	1,00					
ARGILA	0,07	-0,12	*-0,34	-0,30	*-0,46	0,29	-0,23	*-0,41	-0,05	0,59	-0,53	-0,21	-0,16	-0,64	1,00				
DAP	*0,48	0,05	-0,21	0,23	-0,12	0,24	-0,20	-0,04	-0,06	-0,14	0,15	0,06	-0,04	-0,40	0,00	1,00			
h	*0,74	0,24	-0,18	-0,12	*-0,27	0,15	-0,07	-0,15	*0,41	0,31	-0,30	*-0,42	*-0,52	-0,54	0,20	0,29	1,00		
DECLI	*-0,74	-0,10	0,16	-0,01	*0,40	-0,14	0,09	0,10	*-0,37	-0,09	0,10	-0,31	*0,36	0,49	-0,04	*-0,56	*-0,89	1,00	
ELEV	*-0,36	*-0,35	-0,26	0,17	-0,17	*0,34	0,01	-0,06	0,00	0,12	-0,11	-0,23	0,11	-0,34	0,21	-0,08	0,24	-0,15	1,00

Fonte: Autor.

Em que PS: profundidade do solum, EA: espessura do horizonte “A”, SB: soma de bases, CTC: capacidade de troca de cátions, m: saturação por alumínio, Ds: densidade do solo, Pt: porosidade total, Mi: microporosidade, Ks: condutividade hidráulica do solo saturado, ARG: argila, DAP: diâmetro a altura do peito, h: altura da árvore, DECLI: declividade, ELEV: elevação., valores precedidos por * são significativos a 95 %.

À medida que a declividade aumenta e a velocidade do fluxo de água aumentam, a precipitação recebida por unidade de área e sua infiltração diminui, o escoamento e a área de evaporação aumentam, afetando diretamente o potencial de armazenamento de água (FLORINSKY, 2016). Como consequência, ainda que a distribuição de chuva na região de estudo seja frequente (Figura 2) os solos mais rasos, principalmente Neossolos Litólicos, podem vir a ter menor disponibilidade de água para as plantas mesmo em curtos períodos de estiagem.

Embora PS reduzida sugere uma quantidade mais limitada de recursos, principalmente em relação à disponibilidade de água, estudo de Pedron et al. (2011) comprova que em Neossolos a retenção de água nas camadas Cr pode ser maior em relação aos horizontes A. Assim, a infiltração de água e o consequente potencial de armazenamento de água nesses casos está relacionada às frações granulométricas do solo, à quantidade, à espessura, ao ângulo e ao preenchimento das fraturas da camada saprolítica e às condições de relevo e uso atual do solo (STÜRMER et al., 2009), o que fornecerá, ou não, condições para o desenvolvimento de raízes. Isso justifica o fato de solos rasos (RL e RR) oferecerem condições tão distintas, conforme observado na figura 9.

A declividade apresentou correlação com outras variáveis do solo que confirmam as relações estabelecidas a partir da tabela 3. Na paisagem, declividades menores condicionam a formação de solos mais profundos, mais intemperizados, com menor quantidade de materiais primários e maior teor de argila, o que justifica a correlação da declividade com as variáveis físicas Ks ($r = 0,36$) e areia ($r = 0,49$) e químicas CTC ($r = 0,40$) e pH ($r = -0,37$) (Tabela 7). Tanto a granulometria quanto o pH foram correlacionados significativamente com a declividade por Moore et al. (1993) e Andrade et al. (2016), respectivamente.

Em relação as variáveis físicas, a Ks e a areia apresentam uma correlação negativa com altura, sendo $r = -0,52$ e $-0,54$, respectivamente. A altura das árvores também apresentou correlação linear com a Ds ($r = 0,31$), Pt ($r = -0,30$) e Mi ($r = 0,30$) (Tabela 7). Solos com maior teor de areia, em posições declivosas da paisagem que favorecem a alta lixiviação e a baixa capacidade de retenção de água também foram associados aos piores crescimentos do pinus por Santos Filho; Rocha (1987).

Contraparte a estes resultados, as correlações entre a produção de espécies do gênero *Pinus* e solos com menor drenagem, condicionada pela alta microporosidade e maior disponibilidade de água do solo foram negativas para Bognola et al. (2010) e Olarieta et al. (2006) sugerindo que os solos com drenagens mais lentas, prejudicavam o crescimento das árvores. Deve-se salientar que

ambos os estudos foram realizados em região com chuva bem distribuída durante todo o ano, sem deficiência hídrica, em condições climáticas muito parecidas com a do presente estudo. A dissimilaridade entre os resultados pode ser atribuída de uma maneira indireta as imposições causadas pela baixa PS, uma vez que tanto a Ks quanto a areia são maiores quanto mais raso o solo (Tabela 7 e Tabela 5). Além de decrescer em profundidade, a Ks tende a ser maior em solos rasos e com teor maior de areia, conforme já observado na tabela 3. Logo, grande parte da água que chega nestes solos tende a mover-se no sentido do declive, o que facilita a saída de água do sistema e limita ainda mais a capacidade de armazenamento de água para as plantas (KAMPF; CURI, 2012).

Em relação às variáveis químicas, é possível observar relações de causa e efeito demonstradas pelo comportamento linear positivo da MO em relação a CTC ($r = 0,90$), o que evidencia a participação da MO na manifestação de cargas negativas no solo. Quanto à disponibilidade de $H+Al^{+3}$, a correlação alta e positiva ($r = 0,84$) com a MO (Tabela 7) reforça as relações de complexação de neutralização. Potencialmente, o solo possui tanto mais alumínio quanto maior for o teor do mesmo na constituição das argilas. Assim, quando a argila se decompõe, ocorre liberação do Al^{+3} das camadas octaédricas. O Al^{+3} produzido pode permanecer na superfície em forma trocável (deslocando H^+ dos sítios de adsorção do solo) ou passar para a solução do solo. Logo, a m % é maior quanto mais intemperizado é o solo (TIECHER et al., 2016), conforme já comentado (Tabela 4). Ainda, a lixiviação leva à acidificação pela perda direta de cátions básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+), causa a diminuição da saturação de bases, pela geração de saldo positivo de H^+ , que acarreta na diminuição do pH e, consequentemente, aumento da m %, o que justifica as correlações lineares alta e negativa entre a SB e a m % ($r = -0,95$) e o pH ($r = 0,23$) (Tabela 7).

Embora as correlações com as variáveis química do solo não tenham sido muito expressivas, o pH demonstrou um comportamento linear positivo ($r = 0,41$) com a altura das árvores, ou seja, solos menos ácidos resultaram em árvores mais altas. Em concordância, Rigatto et al. (2005) encontrou correlações significativas da produtividade com pH ($r = 0,73$), pesquisando a influência desse atributo sobre a produtividade de madeira do pinus, em Telêmaco Borba, PR. Ainda, Barbosa et al., (2012) apresentaram o pH da camada 0-20 cm ($r = 0,49$) como alternativa para estimativa da produção de madeira de *P. caribaea var. hondurensis* nas condições do Cerrado brasileiro. Porém, segundo a SBCS (2016) o gênero não responde ao aumento do pH, sendo a correção de acidez realizada somente para aumento da SB. Além do mais, conforme apresentado

na tabela 4, não foram observadas mudanças muito significativas de pH ao longo da paisagem que pudesse resultar em grande influência na variação dos parâmetros dendrométricos. Esse resultado pode ter sido influenciado pela PS, já que as árvores maiores estão em Latossolos, solos mais profundos e levemente mais ácidos que os demais.

Em relação à SB, não foi encontrada uma relação linear significativa com a altura ($r = -0,12$), ao contrário do constatado por Rigatto et al., (2005) e Bellote & Dedecek (2006). A relação linear baixa e negativa entre a SB no presente estudo não significa que as árvores cresçam mais na escassez de nutrientes. A explicação possível para esse resultado faz menção à lei do mínimo, em que as condições físicas são impostas como limitantes ao desenvolvimento, ainda que em solos de elevada fertilidade. Castelo et al. (2008) chegaram a conclusões muito próximas e, apesar de destacar variáveis químicas do solo como condicionantes das melhores produtividades, apontam a profundidade efetiva do solo como limitante na taxa de crescimento dos piores sítios. Além disso, conforme já discutido anteriormente, as maiores árvores foram encontradas nos Latossolos (Tabela 6), os quais apresentam boas condições físicas e baixos teores de nutrientes (Tabela 5 e 4).

Cabe salientar que o gênero *Pinus* é conhecido pela sua baixa exigência nutricional (FERREIRA et al., 2001). O que permite o desenvolvimento de espécie em solos extremamente pobres. Ainda que a produtividade se mostre aquém do satisfatório nessas condições, as árvores apresentam uma alta capacidade de gerenciamento de recursos nutricionais, ainda que estes sejam escassos (CHAVES; CORREIA, 2003). Os trabalhos relacionados com a carência nutricional em pinus no Brasil ainda são raros. Uma das principais razões é a rapidez de crescimento e a ausência de sintomas de deficiência, especialmente durante as primeiras rotações, o que reforça a expectativa de que a espécie dispensa grandes cuidados com adubação, ou ainda, que é totalmente dispensável (REISSMANN; WISNIEWSKY, 2001). O elevado aproveitamento dos recursos nutricionais do solo pelo gênero *Pinus* pode ser explicado como reflexo da atividade intensa de associação simbiótica entre as árvores e os microrganismos do solo, especialmente fungos micorrízicos. Em geral, a associação com fungos (ectomicorrízicos) propicia aumento na absorção de nutrientes, principalmente de P, e de água pela planta hospedeira.

Uma das explicações descritas na literatura é que a absorção de nutrientes pela planta gera uma zona de reduzida concentração de nutrientes ao redor das raízes (rizosfera), especialmente para aqueles elementos químicos de baixa mobilidade no solo. As hifas fúngicas, associadas às raízes da planta hospedeira, são capazes de ultrapassar essa região de baixa concentração de

nutrientes, indo explorar regiões além do alcance das raízes. Assim, ainda que os elementos essenciais estejam presentes em quantidades limitadas, desde que a rede de hifas das micorrizas se estenda para além da zona colonizada pelas raízes, as plantas se tornam aptas a obter nutrientes pelo aumento da superfície de absorção e do volume de solo explorado (SMITH; READ, 2009).

Os fungos ectomicorrízicos têm também a habilidade de tornar disponíveis certas formas de nutrientes presentes no solo que estão naturalmente indisponíveis para os vegetais. As hifas fúngicas são capazes de secretar ácidos orgânicos, tais como o ácido cítrico e o oxálico, capazes de solubilizar o fósforo precipitado com Al, Fe e Ca, tornando-o disponível para a planta (COSTA et al., 2003), dadas as constatações de mudanças na depleção de formas inorgânicas e orgânicas na rizosfera de plantio de pinus (CHEN et al., 2002; LI et al., 2008). Além disso, correlação da MO e do P ($r = 0,47$) demonstra que a maior reserva de fósforo do solo corresponde ao fósforo orgânico, ligado a compostos de carbono. Além desses mecanismos, a produção de proteinases extracelulares e a maior longevidade das raízes associadas aos fungos ectomicorrízicos contribuem significativamente para a melhor nutrição vegetal (SMITH; READ, 2008; COSTA et al., 2003), aumentando também na tolerância de pinus a metais pesados (CAMPOS et al., 2017).

Em relação a estrutura do solo, constata-se o efeito da granulometria e da MO na determinação das variáveis físicas. Em relação à granulometria, em frações mais finas a Pt tende a ser maior em consequência do aumento da Ds, dadas as correlações entre Pt ($r = 0,59$) e Ds ($r = -0,53$) com a argila (Tabela 7). A relação entre a MO e a estrutura do solo é clássica. As relações feitas entre MO e a estrutura do solo na discussão da tabela 5, podem ser confirmadas pelas correlações altas e positivas entre a MO e a Pt ($r = 0,78$) e Ds ($r = 0,75$) apresentadas na tabela 7. Logo, quando os teores de MO são baixos, espera-se uma menor retenção e infiltração de água no solo, menor agregação e porosidade, portanto uma menor capacidade de fornecer água e nutrientes às árvores, resultando em menor produtividade. Porém, ao contrário do esperado, a MO apresentou correlação negativa muito baixa com a altura ($r = -0,15$) e DAP ($R = -0,04$) (Tabela 7).

Espécies do gênero *Pinus* são capazes de sobreviver a severas condições de falta de água e nutrientes devido às características radiculares. Ainda que a maior parte da absorção radicular do pinus seja nos primeiros 30 cm do solo (SCHUMACHER et al., 2005), muitas vezes a extensão do sistema radicular é que define a eficiência da planta no aproveitamento dos recursos, em decorrência do volume de solo explorado na busca pela manutenção da produção fotossintética. De modo geral, em solos com baixa disponibilidade de água e nutrientes, as árvores tendem a produzir

raízes mais longas. Assim, fotoassimilados são destinados ao desenvolvimento do sistema radicular em detrimento do crescimento em altura, na tentativa de suprir suas necessidades (GONÇALVES; MELLO, 2005), o que pode justificar o fato de árvores mais baixas serem encontradas em solos mais rasos (Tabela 6).

Ainda que o principal fator envolvido na distribuição das raízes no solo seja o genótipo da espécie, variáveis do solo como fertilidade, densidade, disponibilidade de oxigênio, efeito do pH, textura, temperatura além da competição dentro do povoamento podem determinar a arquitetura radicular conforme as necessidades das plantas (GONÇALVES; MELLO, 2005), o que reforça a importância de solos profundos especialmente em condições de baixa fertilidade e umidade.

Quando o impedimento ao crescimento de raízes é severo, como o contato lítico, podem ocorrer alterações significativas na morfologia e na distribuição espacial das raízes. Isso acontece por que ao encontrar condições de limitação em profundidade, ocorre uma intensa proliferação de eixos laterais, que irão contribuir para o aumento da superfície específica radicular (ZONTA et al., 2006). Além de absorver água e sais minerais e produzir hormônios reguladores de crescimento (TAIZ; ZEIGER, 2004), o sistema radicular é responsável por manter a planta fixa ao substrato. Logo, esta estratégia de crescimento das raízes em proporções horizontais pode acarretar em zonas de acúmulo de raízes aumentando. Dependendo do tipo de contato lítico e saprolítico, as condições oferecidas às plantas podem variar consideravelmente (STÜRMER et al., 2009) fazendo com que a camada Cr seja explorada (PEDRON et al., 2011) e o volume de solo explorado pelo sistema radicular aumente. Porém, em casos de impedimento severo, estas zonas de acúmulo radicular aumentam a susceptibilidade ao tombamento, principalmente por se tratar de uma espécie de grande porte. Esse risco é agravado com a diminuição da densidade de árvores pelas intervenções de desbaste. Todas estas alterações discutidas em relação ao comportamento radicular foram observadas na etapa de levantamento de dados do presente estudo e as principais constatações a respeito das modificações morfológicas e espaciais que das raízes em resposta aos solos rasos, constam no apêndice.

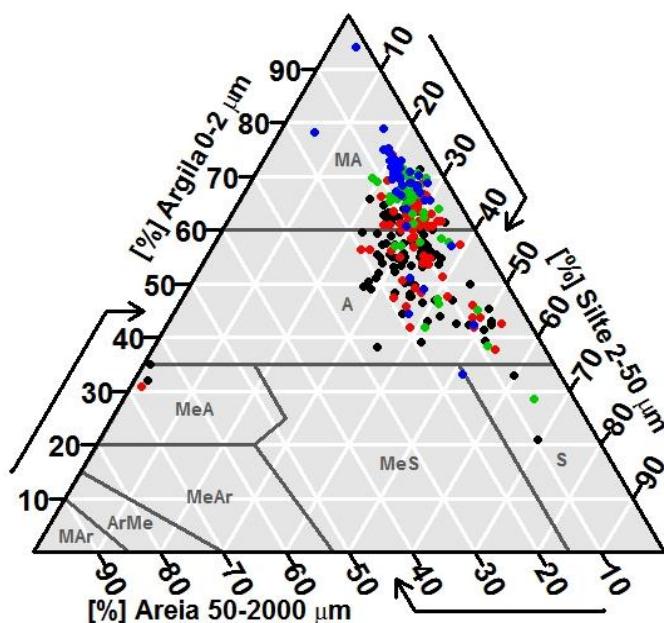
Além disso, os impedimentos físicos do solo reduzem a expressão dos efeitos das variáveis químicas nos solos sobre o crescimento da espécie. Fica evidente então que, dentro das condições do presente estudo, as variáveis relacionadas à fertilidade não são responsáveis diretamente pelas variações do crescimento em altura das árvores. Pode-se afirmar que as características morfológicas do solo prevalecem sobre as químicas na determinação de maiores alturas e

diâmetros, corroborando com resultados encontrados nos trabalhos de Dedecek et al., (2008), Bognola, (2007), Bellote; Dedecek (2006) e Correia et al. (1996).

5.3. CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO CONJUNTO 2

Dos 102 pontos da amostragem 2, 62 apresentaram apenas camada 0 - 20 cm e 41 pontos apresentaram camada superior a 60 cm, observados pelos valores de “n” nas profundidades de análise granulométrica (Tabela 8). Não foi observado incremento de argila em profundidade. Há uma predominância de solos de textura argilosa e muito argilosa, com conteúdo médio de argila variando de 556 g kg⁻¹ a 689 g kg⁻¹ (Figura 10).

Figura 10 - Distribuição do tamanho de partículas das amostras de solo do conjunto 2 e a sua relação com a profundidade (preto: 0 - 20 cm, vermelho: 20 - 40 cm, verde: 40 - 60 cm e azul 60 - 100 cm)



Fonte: Autor

Em que: MA: muito argilosa, A: argilosa, S: siltosa, MeS: média siltosa, MeA: média argilosa, MeAr: média arenosa, ArMe: arenosa média, Mar: muito arenosa.

Em relação ao comportamento das plantas, a textura do solo afeta a CTC, a estrutura e influencia diretamente na distribuição de raízes das árvores. A textura homogênea ao longo de toda a PS, apresentam normalmente uma distribuição radicular que decresce em profundidade, podendo ainda ser alteradas pela ação de agentes de impedimento (ZONTA et al., 2006), discutidos

anteriormente. Além disso, conforme os padrões estabelecidos anteriormente, a textura argilosa e muito argila confere aos solos uma Pt menor, uma menor Ks e uma maior CTC.

Tabela 8 - Medidas de estatísticas descritivas do conjunto 2

	n	média	mediana	dp	cv%	mín	máx	p-value
Variáveis Pedológicas								
Areia 0-20	102	133	121	86	65	30	660	2,4E-15*
Areia 20-40	64	106	93	82	77	36	675	3,4E-13*
Areia 40-60	53	77	71	28	36	29	170	2,6E-03*
Areia 60-100	41	75	63	36	48	18	182	3,5E-05*
Argila 0-20	102	541	556	85	16	210	714	2,2E-04*
Argila 20-40	64	578	609	86	15	310	742	1,7E-03*
Argila 40-60	53	637	667	92	14	287	728	3,8E-08*
Argila 60-100	41	651	689	138	21	42	789	5,7E-08*
PS	102	59	60	36	61	10	150	2,5E-08*
EA	102	31	30	14	45	10	70	2,1E-07*
Variáveis dendrométricas								
DAP	102	46,7	46,6	4,2	9	37,9	60,4	2,4E-03*
h	102	30,9	30,8	2,6	8	24,0	36,5	5,9E-01
Variáveis topográficas								
ELEV	102	906	904	14	2	879	934	7,3E-03*
DECLI	102	12	12	07	58	01	40	1,8E-05*
TI	102	4,73	4,76	0,40	8	3,62	5,85	6,0E-02
TRI	102	0,90	0,87	0,51	57	0,09	2,99	3,9E-06*
TWI	102	6,05	5,73	1,50	25	4,09	12,17	4,3E-09*
VD	102	18,18	18,50	10,79	59	0,13	37,70	3,0E-04*
VDCN	102	8,54	6,15	10,12	119	-6,07	36,80	4,5E-06*
AH	102	0,96	1,00	0,33	34	0,20	1,71	1,9E-01
ASP	102	3,51	3,22	1,18	34	0,41	6,11	1,8E-02*
CA	102	3420	598	11534	337	134	76982	2,2E-16*
CIN	102	0,97	1,80	6,76	697	-25,36	21,90	2,1E-07*
CNBL	102	897,50	896,78	9,44	1	882,61	926,42	3,6E-08*
DUI	102	11,37	11,49	0,44	4	9,98	12,00	1,4E-04*
LS	102	1,39	1,30	0,99	71	0,06	5,67	9,8E-08*

Fonte: Autor.

Em que n: número de amostras, dp: desvio padrão, cv: coeficiente de variação, mín: mínimo, máx: máximo, p-value: valor de significância a 5% para teste de Shapiro-Wilk, valores seguidos de * não apresentam distribuição normal, PS: profundidade do solum, EA: espessura do horizonte A, DAP: diâmetro altura do peito, h: altura da árvore, ELEV: elevação, DECLI: declividade, TI: insolação total, TRI: índice de rugosidade do terreno, TWI: índice de umidade topográfico, VD: profundidade do vale, VDCN: distância vertical da rede de drenagem, AH: análise do sombreamento, ASP: aspecto, CA: área de contribuição, CIN: índice de curvatura, CNBL: nível base da rede de drenagem, DUI: duração da insolação e LS: fator LS.

A PS mostrou-se próxima aos intervalos encontrados no conjunto 1 (Tabela 3), com mínimo de 10 cm e máximo de 150 cm, média de 59 cm, mediana de 60 cm e desvio padrão de 36 cm (Tabela 8). A EA ultrapassou o valor máximo encontrado anteriormente, passando de 60 cm no conjunto 1 (Tabela 3) para 70 cm no conjunto 2 (Tabela 8). Isso é consequência do aumento do plano amostral, sendo coletadas informações em elevações mais baixas (879 m) e mais altas (934 m) (Tabela 8) em relação ao conjunto 1 (Tabela 3). Além disso, a declividade média da amostragem aumentou consideravelmente, passando a contemplar áreas mais declivosas (40% de declividade máxima).

5.4. CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO CONJUNTO 2

A PS manteve correlações lineares positivas, apresentando $r = 0,39$ com a altura das árvores e $0,26$ com o DAP. Da mesma forma, a EA apresentou $r = 0,27$ para altura e $0,15$ para o DAP (Tabela 9 e Figura 11). Resultado semelhante ao apontado por Morales et al., (2010), que verificou uma maior produtividade dos sítios nos perfis de solo mais profundos. Corroborando, Gomes et al., (2016) ao definir unidades de manejo para pinus, identificaram as variáveis profundidade efetiva do solo e relevo como as principais limitações para o cultivo em Santa Catarina.

Os valores dos coeficientes de correlação de granulometria do solo com a altura das árvores aumentaram em função da profundidade. Os teores de areia e argila na profundidade 60 – 100 cm apresentaram $r = 0,29$ e $0,30$, respectivamente com a altura das árvores e valores muito baixos para DAP ($r \leq 0,18$), porém não apresentaram significância a 95 % (Tabela 9). A altura das plantas foi influenciada pela textura do solo nos trabalhos de Dedecek et al. (2008) e Rigatto et al. (2005). Para ambos em solos de textura argilosa as alturas são maiores do que em solos de textura média. Conforme exposto pelos autores, a capacidade de retenção de água do solo é um dos fatores que pode limitar o crescimento do pinus, onde solos com maiores teores de areia e consequentemente com menor capacidade de armazenamento de água e nutrientes apresentem menor potencial de produção.

Em relação às variáveis topográficas, a distância vertical da rede de drenagem (VDCN) e a profundidade do vale (VD) apresentaram correlação de $r = -0,44$ e $0,38$ com a altura das árvores, respectivamente, porém para o CAP, somente o VDCV mostrou-se relevante ($r = -0,36$) (Tabela 9 e Figura 11). Enquanto a VDCN indica a altitude acima da rede de canais em que o ponto (ou

célula) se encontra, a VD é a diferença entre a elevação e o VDCN. Logo, quanto mais acima da rede de canais, e menor a diferença com a elevação, maior a altura constatada nas árvores. Da mesma forma, a elevação apresentou correlações negativas com as variáveis dendrométricas, sendo $r = -0,45$ em relação à altura e $r = -0,28$ em relação ao DAP.

Para compreender estes resultados é importante salientar que os solos mais próximos à rede de canais são Neossolos Litólicos e Neossolos Regolíticos, localizados em encosta íngremes (Tabela 2). Tão logo a distância da rede de drenagem aumenta, a declividade diminui e solos mais desenvolvidos são encontrados. Existe, portanto, uma relação evidente entre a posição que os solos ocupam em relação a rede de canais e ao nível em relação ao lençol freático.

Tabela 9 - Coeficientes de correlação de Spearman entre variáveis do conjunto 2

(continua)

	AREIA_1	ARGILA_1	AREIA_2	ARGILA_2	AREIA_3	ARGILA_3	AREIA_4	ARGILA_4
AREIA_1	1							
ARGILA_1	*-0,33	1						
AREIA_2	**0,54	-0,07	1					
ARGILA_2	-0,16	*0,49	*-0,52	1				
AREIA_3	*0,47	-0,06	*0,64	*-0,35	1			
ARGILA_3	*-0,32	*0,49	*-0,43	*0,56	-0,49	1		
AREIA_4	0,18	0,08	*0,32	-0,16	0,24	-0,09	1	
ARGILA_4	0,11	0,1	0,08	0,04	0,18	-0,18	0,58	1
PS	0,1	*0,2	*0,3	0,06	0,23	0,08	0,21	0,21
EA	0,12	0,11	*0,27	0,02	0,21	0,01	0,15	-0,33
CAP	-0,03	0,13	0,12	-0,1	-0,18	0,13	0,03	-0,13
h	-0,04	0,13	0,08	-0,06	0,15	-0,16	0,29	0,3
LS	-0,11	-0,02	-0,13	-0,02	-0,01	-0,21	0,09	0,12
SL	-0,1	-0,07	-0,2	0,01	-0,08	-0,16	0,03	0,09
TI	*-0,22	-0,09	-0,18	-0,11	0,03	-0,06	0,07	0,07
TRI	-0,1	-0,07	-0,21	0	-0,07	-0,17	0,03	0,11
TWI	0,02	0,11	0,14	0,08	0,1	0,06	0,03	-0,14
VD	0,01	0,1	-0,02	0,03	0,07	-0,35	-0,02	0,27
VDCN	0,04	-0,03	-0,08	0,01	-0,06	0,09	-0,04	-0,09
AH	*-0,24	-0,06	-0,12	-0,21	-0,02	-0,18	0,16	-0,06
ASP	*0,2	-0,02	-0,03	0,21	0,09	0,1	-0,13	0,14
CA	-0,04	0,13	0,06	0,15	0,09	0,02	0,06	-0,09
CIN	-0,02	-0,03	-0,16	-0,09	-0,01	-0,03	0,11	0,19
CNBL	0,03	-0,01	0,15	-0,08	0,04	0,26	0,15	-0,22
DUI	-0,07	-0,07	0,06	-0,15	0,13	0,16	0,08	0,05
ELEV	0,08	0	0,14	-0,05	0,06	0,2	0,1	-0,18

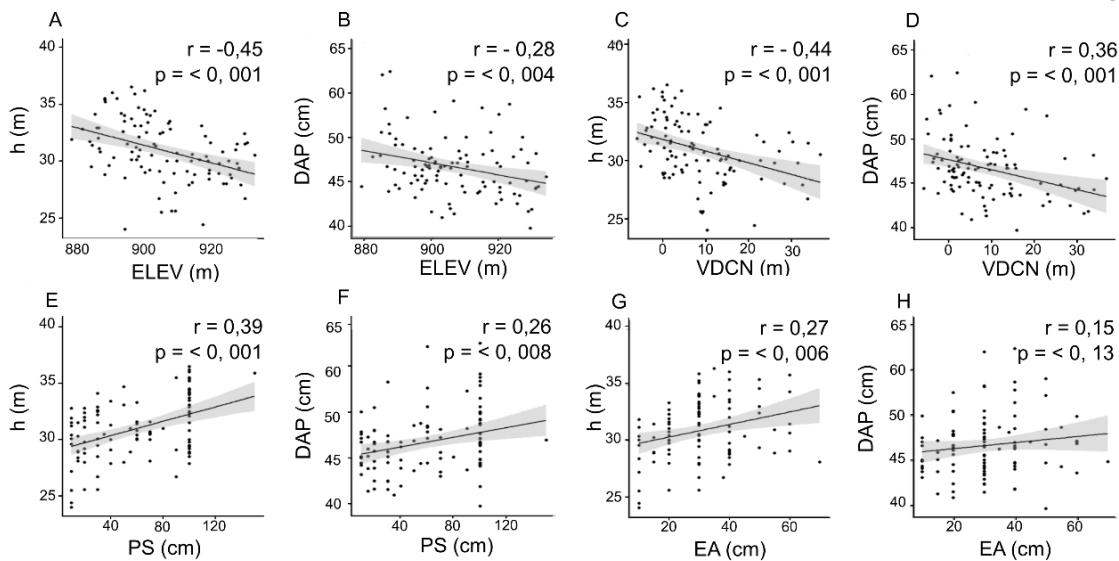
(conclusão)

	PS	EA	CAP	h	LS	DECLI	TI	TRI	TWI	VD	VDCN	AH	ASP	CA	CIN	CNBL	DUI	ELEV
AREIA_1																		
ARGILA_1																		
AREIA_2																		
ARGILA_2																		
AREIA_3																		
ARGILA_3																		
AREIA_4																		
ARGILA_4																		
PS	1																	
EA	*0,71	1																
CAP	*0,26	0,15	1															
h	*0,39	*0,27	*0,32	1														
LS	*-0,26	*-0,22	-0,05	0,13	1													
DECLI	*-0,27	*-0,26	-0,06	0,1	*0,92	1												
TI	*-0,2	-0,04	-0,14	-0,03	*0,53	*0,52	1											
TRI	*-0,27	*-0,25	-0,06	0,11	*0,93	*1	*0,52	1										
TWI	0,16	*0,22	0,07	0,05	*-0,24	*-0,52	*-0,23	*-0,53	1									
VD	-0,08	-0,17	0,06	*0,38	*0,3	*0,24	-0,05	*0,24	0,04	1								
VDCN	-0,05	-0,09	*-0,36	*-0,44	*-0,29	-0,18	-0,08	-0,19	-0,16	*-0,59	1							
AH	-0,15	0,04	-0,12	0,03	**0,5	*0,49	*0,86	*0,5	*-0,2	-0,02	-0,13	1						
ASP	-0,01	-0,12	0,07	-0,05	*-0,23	*-0,21	*-0,47	*-0,23	0,02	0,05	0,14	*-0,79	1					
CA	0,03	0,08	0,05	0,13	*0,33	*0,04	0,08	0,04	*0,78	*0,21	*-0,36	0,08	-0,12	1				
CIN	-0,07	-0,08	-0,05	0,03	*-0,24	-0,02	-0,06	-0,02	*-0,54	-0,09	0,17	-0,12	*0,21	*-0,71	1			
CNBL	*0,21	*0,33	-0,04	*-0,2	*-0,24	*-0,31	0,15	*-0,31	*0,27	*-0,42	0,13	0,12	-0,1	0,12	-0,14	1		
DUI	0,06	0,19	-0,16	-0,13	*-0,43	*-0,39	*0,29	*-0,39	0,01	*-0,43	0,19	0,18	-0,03	*-0,27	*0,32	*0,41	1	
ELEV	0,12	0,17	*-0,28	*-0,45	**-0,4	*-0,38	-0,01	**-0,38	0,11	*-0,68	**0,7	-0,04	0,03	-0,13	0,01	*0,72	*0,4	1

Fonte: Autor.

Em que _1: camada 0 - 20 cm, _2: camada 20 - 40 cm, _3: camada 40 - 60 cm, _4: camada 60 - 100 cm, PS: profundidade do solum, EA: espessura do horizonte A, DAP: circunferência a altura do peito, h: altura das árvores, LS: fator LS, DECLI: declividade, TPI: índice de posição topográfico, TRI: índice de rugosidade do terreno, TWI: índice de umidade topográfico, VD: profundidade do vale, VDCN: distância vertical da rede de drenagem, AH: sombreamento do relevo, ASP: aspecto, CA: área de captação, CIN: índice de convergência, CNBL: canal base da rede de drenagem, DUI: duração da insolação e ELEV: elevação, valores precedidos por * são significativos a 95 %

Figura 11 - Gráficos da correlação linear de Spearman entre as variáveis dendrométricas com correlação significativa com variáveis pedológicas e topográficas.



Fonte: Autor.

Em que A: Relação linear entre altura (h) e elevação (ELEV); B: Relação linear entre diâmetro a altura do peito (DAP) e elevação (ELEV); C: Relação linear entre altura (h) e distância vertical da rede de drenagem (VDCN); D: Relação linear entre diâmetro a altura do peito (DAP) e distância vertical da rede de drenagem (VDCN); E: Relação linear entre altura (h) e profundidade do solum (PS); F: Relação linear entre diâmetro a altura do peito (DAP) e profundidade do solum (PS); G: Relação linear entre altura (h) e espessura do horizonte A (EA); H: Relação linear entre diâmetro a altura do peito (DAP) e espessura do horizonte A (EA).

A importância da declividade para explicar as variações de produtividade reduziu para $r = 0,10$ em relação à altura e $r = -0,06$ em relação ao CAP (Tabela 9), comparado com resultados observados no conjunto 1 (Tabela 7). Em contrapartida, a elevação manteve o coeficiente de correlação muito próximo ao obtido a partir do conjunto 1 ($r = -0,45$ em relação à altura e $r = -0,28$ em relação ao CAP). Esse resultado pode ser reflexo do aumento da variação das declividades, que por consequência suavizou esses padrões, frente à heterogeneidade das observações. Logo, quando consideramos toda a variabilidade local, a declividade deixa de ser o melhor indicador de produtividade.

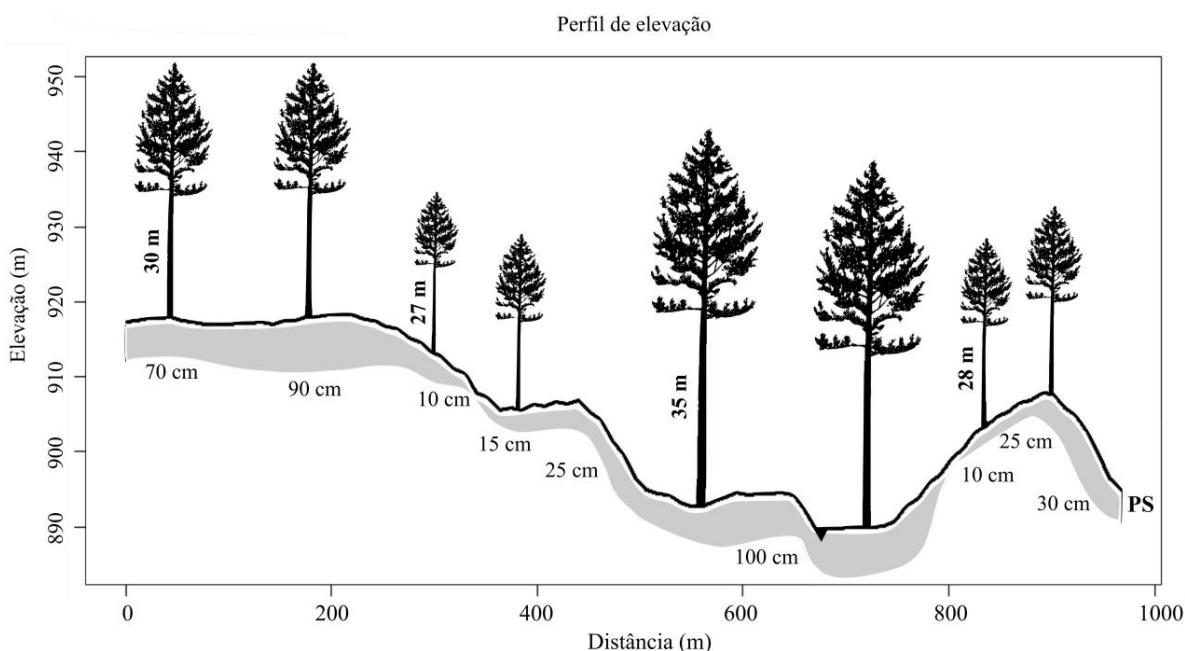
Essa mudança no comportamento das relações entre a altura das árvores e a declividade aponta para a necessidade de ampliar o conjunto de amostragem na inferência sobre a produção. Na literatura a avaliação das relações entre a produtividade das árvores restringe-se a grupos de parcela, normalmente parcelas de inventário contínuo (PIC), o que nem sempre apresenta uma boa representatividade da variabilidade local, frente à complexidade das interações.

A DECLI apresentou correlação negativa com a PS ($r = -0,27$) e com a EA ($r = -0,26$), sendo esta, considerada a principal condicionante da PS em vários estudos (YANG et al., 2016; AKUMU et al., 2016; MEHNATKESH et al., 2013; PENÍŽEK, BORŮVKA, 2006; TSAI et

al., 2001). Também observado em relação ao fator LS, variável representante do efeito da topografia sobre a erosão, que demonstrou uma relação linear negativa com a PS ($r = -0,27$) e a EA ($r = -0,26$). Logo, quanto maior a declividade, maior o potencial erosivo do solo e consequentemente, menor sua espessura. Logo, tanto a PS quanto a EA são maiores em relevo plano e menores em locais de maior declividade e em áreas mais distantes das encostas (KAMPF; CURI, 2012). Resultados muito próximos foram encontradas por Mehnatkesh et al. (2013) que encontraram correlações da PS positivas com a CA ($r = 0,65$), CIN ($r = 0,66$) e TWI ($r = 0,71$) e negativa com ELEV ($r = -0,23$).

Dentro das variações locais de solos e topografia, as variáveis PS, EA, ELEV e VDCN são as principais responsáveis pelos diferentes níveis de produtividade de pinus, demonstrando assim o potencial destas variáveis como indicadoras de qualidade para seleção de áreas que potencializem o desenvolvimento da espécie. Essas relações são confirmadas ao observar o perfil de elevação da área de estudo com dados de campo (Figura 12) em que as árvores mais altas foram encontradas em solos mais profundos, com horizonte superficial mais espesso, em áreas mais baixas e mais próximas verticalmente da rede de drenagem.

Figura 12 - Perfil de elevação da paisagem e sua relação com a profundidade do solum (área hachurada em cinza) e altura das árvores (fora de escala)



Fonte: Autor.

5.5. FUNÇÕES DE PREDIÇÃO

Na tabela 10 é apresentado o resumo estatístico de avaliação das FPS construídas a partir do conjunto A e B por RLM e RF de PS e EA elegidas as principais condicionantes da variação dendrométrica na paisagem. A complexidade da paisagem e elevada variabilidade da paisagem resultou em uma considerável dificuldade na predição das variáveis.

De modo geral, o modelo RF apresentou o mínimo de erro a partir do conjunto de treinamento, mantendo resultados superiores a RLM na validação. Porém, é possível observar certas discrepâncias entre os resultados de treinamento e validação dos modelos. Apesar da variabilidade em um conjunto amostral ser necessária para que os modelos consigam estabelecer relações entre as variáveis dependentes e independentes, estas discrepâncias podem ser um indicativo de que o conjunto de dados utilizados para o treinamento não representem de maneira adequada a variabilidade dos dados da população.

Tabela 10 - Resumo estatístico das FPS geradas por dois métodos multivariados com diferentes conjuntos de variáveis preditoras

Modelo	Conjunto	n_t	n_v	Treinamento		Validação	
				R^2_t	$RMSE_t$	R^2_v	$RMSE_v$
PS (cm)							
RLM	A	72	30	0,25	30,30	0,07	40,10
	B			0,56	23,27	0,19	39,37
RF	A	72	30	0,93	15,25	0,25	30,23
	B			0,42	26,71	0,27	32,07
EA (cm)							
RLM	A	72	30	0,25	12,13	0,11	13,25
	B			0,38	11,02	0,19	11,86
RF	A	72	30	0,92	5,75	0,15	11,75
	B			0,46	9,71	0,20	9,33

Fonte: Autor.

Em que A: conjunto de covariáveis A, B: conjunto de covariáveis B, RLM: regressão linear múltipla; RF: random forest; n: número de amostras, R^2 : coeficiente de determinação, RMSE: raiz do erro quadrático médio, t: treinamento, v: validação.

Assumindo que nem todos os possíveis valores da população das variáveis preditas são conhecidos e que o modelo deve responder de maneira adequada a novos valores, é na validação dos modelos que a predição deve ser avaliada. Assim, não importa o quanto alto sejam as estatísticas de treinamento, uma vez que o algoritmo pode apenas ter “memorizado os exemplos” fornecidos, é necessário que as relações estabelecidas na fase de treinamento possibilitem a generalização do modelo para outras situações.

Os modelos demonstraram dificuldade em predizer de forma satisfatória quando aplicado em dados externos (conjunto de validação) provavelmente por generalizar incorretamente peculiaridades do conjunto amostral. Isso acontece porque, em vez do modelo incorporar os padrões de distribuição da PS e EA que ocorrem na população amostrada, o modelo infere particularidades do conjunto de amostras apresentado para treinamento. Assim, a baixa representatividade do conjunto amostral no presente trabalho pode ter prejudicar a predição.

Durante a construção do modelo por RF são criadas várias árvores de decisão usando subconjuntos de variáveis selecionados aleatoriamente a partir do conjunto original, sendo geradas estimativas imparciais internas do erro de generalização à medida que avança a construção das árvores de decisão (BREIMAN, 2001). Comparando RF e RLM na estimação da densidade do solo Carvalho-Junior et al. (2016) descreveram um comportamento muito semelhante ao encontrado no presente estudo em relação aos modelos. Segundo os autores, o melhor desempenho e menor variação das estatísticas de validação obtidas via RF estão associados a estas estimativas médias dos nós terminais das AD, que acabam diluindo os erros. Além disso, os resultados superiores de validação por RF para PS e EA no presente trabalho (Tabela 10), podem ser explicados pela capacidade do modelo em processar as relações não lineares entre as variáveis preditoras e a variável dependente.

5.5.1. Predição da PS

As FPS construídas para PS apresentaram R_v^2 variando entre 0,07 e 0,27 e RMSE_v entre 30,23 e 40,10 cm (Tabela 10). Em relação aos modelos utilizados para gerar as FPS, o modelo RF apresentou o melhor desempenho na validação nos conjuntos A e B, com valores de RMSE de 30,23 e 32,07 cm, respectivamente. Considerando que a média de PS do solo na área é aproximadamente 60 cm (Tabela 8), ao admitir esse erro podemos subestimar ou superestimar em 50 % a média da PS. Esse valor torna-se expressivo quando consideramos que apenas 64 pontos possuem profundidade superior 20 cm (Tabela 8).

Na literatura, os trabalhos de predição de PS têm demonstrado resultados superiores aos do presente estudo. No sudoeste da China, Yang et al. (2016) trabalhando com a predição da PS via RLM, obtiveram na validação $R^2 = 0,71$ e RMSE muito baixo (3,78 cm). Para chegar nesse resultado os autores utilizaram um conjunto de 171 amostras (70 % treinamento e 20 % validação) e nove variáveis preditoras extraídas do MDE em uma área de 10 km². Além disso,

os autores afirmam que os atributos do terreno derivados dos MDE na resolução de 10 m foram os melhores para predição da PS.

No sul da Austrália, prevendo a espessura do regolito, variando entre 0 e 700 cm, em uma área de 128.000 ha, Wilford; Thomas (2013) utilizaram 29 variáveis (7 geológicas, 10 climáticas e 12 topográficas) com resolução de 10 m para construir uma FPS com o modelo RLM, com um total de 714 amostras variando entre 0 e 700 cm (75 % treinamento e 25 % validação) e obtiveram valores de $R^2 = 0,70$ e RMSE de 92,54 cm para treinamento e R^2 de 0,64 e RMSE de 112,89 cm na validação. Os autores comentam que, apesar do forte controle que a topografia exerce sobre a profundidade do solo, os atributos climáticos utilizados refletiram os fortes gradientes climáticos locais e auxiliaram na predição. Apesar dos resultados serem promissores, Wilford; Thomas (2013) observaram certa dificuldade na predição de profundidades rasas, em que 178 amostras com profundidades até 1 m (25 % do conjunto amostral total), resultou em um valor de R^2 de 0,19 na predição.

Mehnatkesh et al. (2013), usando 100 pontos em uma amostragem condicionada para predição da PS encontraram a partir da RLM $R^2 = 0,88$ e RMSE= 1,23 cm, porém também nesse estudo os dados utilizados para treinamento e validação dos modelos demonstram um predomínio de solos profundos com PS média de 108,63 cm. Tsai et al. (2001), estabeleceram modelos lineares de regressão para predição da PS e espessura do horizonte A e B no sul de Taiwan. Os autores utilizaram informações de 310 pontos na proporção 60/40 % para treinamento e validação com as variáveis preditoras ELEV, DECLI e ASP e informações de PS variando entre 5 e 130 cm, e encontraram $R^2_v = 0,07$ e RMSE_v= 16,13 cm na predição da PS. Estes resultados sugerem que a dificuldade na predição no presente estudo pode estar associada à pequena amplitude da PS (Tabela 8) e a pequena área de amostragem em relação aos trabalhos apresentados o que pode ter dificultado o estabelecimento de padrões pelas FPS.

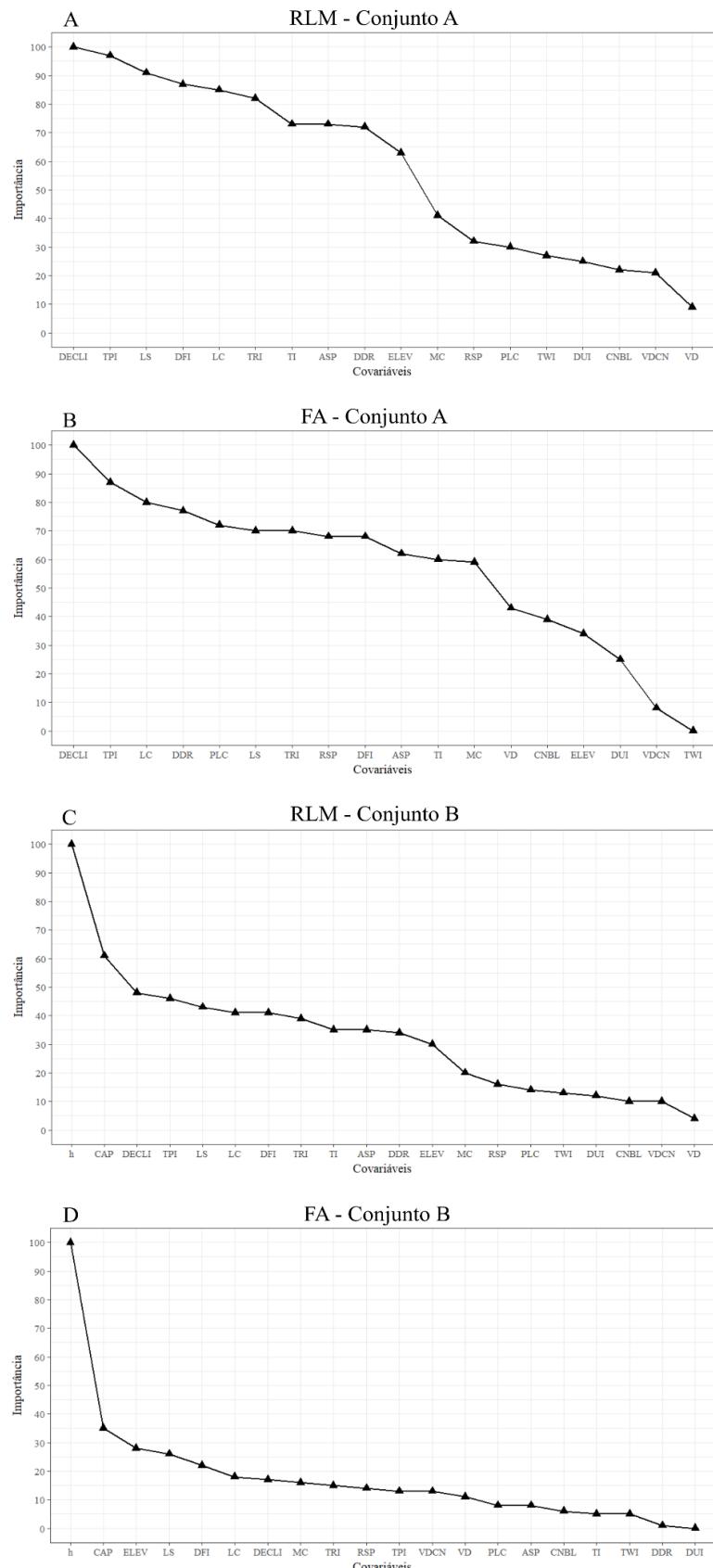
É possível notar o potencial diferenciado de cada variável na discriminação de padrões (Figura 13). As PFS treinadas com o conjunto A (variáveis topográficas) apresentaram valores de R^2_t inferiores ao conjunto B (variáveis topográficas e dendrométricas), que se mantiveram na validação nos modelos. Esse resultado é reflexo da relação à natureza dos processos que são responsáveis pela variação na PS ao longo da paisagem, do grau de relação entre a PS e as variáveis preditoras utilizadas e da natureza dos modelos utilizado para construir as relações. Além disso, ainda que a posição em alguns pontos na paisagem seja idêntica em relação as variáveis topográficas, a rocha pode estar mais próxima da superfície em determinados locais, fazendo com que a PS seja menor, o que dificulta o estabelecimento de relações entre as variáveis preditores e a PS.

As variáveis consideradas as mais importantes em ambos os modelos estão relacionadas com o volume de água que percola no perfil, taxa dos processos de perda e adição de sedimentos, condições de drenagem, distribuição da energia potencial da água na paisagem, refletindo diretamente na gênese do solo (BUOL et al., 2011), com reflexos na PS. Quando os modelos foram treinados com o conjunto A, a variável mais importante foi a DECLI, seguida por TPI, TRI, LC e LS (Figura 12AB). Isso é reflexo das correlações apontadas anteriormente entre a PS e estas variáveis (Tabela 9). Essas variáveis, principalmente DECLI e ELEV foram semelhantemente úteis para predição da PS para Yang et al. (2016), Mehnatkesh et al. (2013), Penížek, Boruvka, (2006) e Tsai et al. (2001).

Foi observado comportamento distinto entre os modelos RF e RLM em relação ao grau de importância de algumas variáveis, por exemplo, as variáveis RPS e VD foram consideradas importantes no modelo RF, sendo o inverso observado no modelo RLM (Figura 12 AB), provavelmente relacionado ao comportamento não linear entre essas variáveis e a PS.

Quando os modelos foram treinados com o conjunto B, a variável mais importante foi a variável dendrométrica h para ambos os modelos, com quase o dobro da importância em relação às demais variáveis (Figura 13AB). A adição da h como preditora da PS fez o R^2_v passar de 0,25 no conjunto A, para 0,27 no conjunto B com o modelo RF (Tabela 10), demonstrando a relação entre as duas variáveis, o que confirma mais uma vez a hipótese de que a profundidade tem uma relação direta com a altura das árvores.

Figura 13 - Escala de importância de variáveis preditoras da profundidade do solum (A) conjunto A e (B) conjunto B



Fonte: Autor.

Em que: PS: profundidade do solum, EA: espessura do horizonte A, DAP: circunferência a altura do peito, h: altura das árvores, LS: fator LS, DECLI: declividade, TPI: índice de posição topográfico, TRI: índice de rugosidade do terreno, TWI: índice de umidade topográfico, VD: profundidade do vale, VDCN: distância vertical da rede de drenagem, AH: sombreamento do relevo, ASP: aspecto, CA: área de captação, CIN: índice de convergência, CNBL: canal base da rede de drenagem, DUI: duração da insolação e ELEV: elevação.

As informações dendrométricas já foram utilizadas para predição de PS. Beh et al. (2016) demonstraram que a forma e o afunilamento e a altura da árvore de *Pinus radiata* são preditores robustos da profundidade do solo e propuseram a utilização das informações dendrométricas como estratégia para reduzir o custo da coleta de dados sobre o solo e melhorar o mapeamento do solo florestal em escala fina, principalmente quando o objeto é a inferência sobre o estoque de carbono.

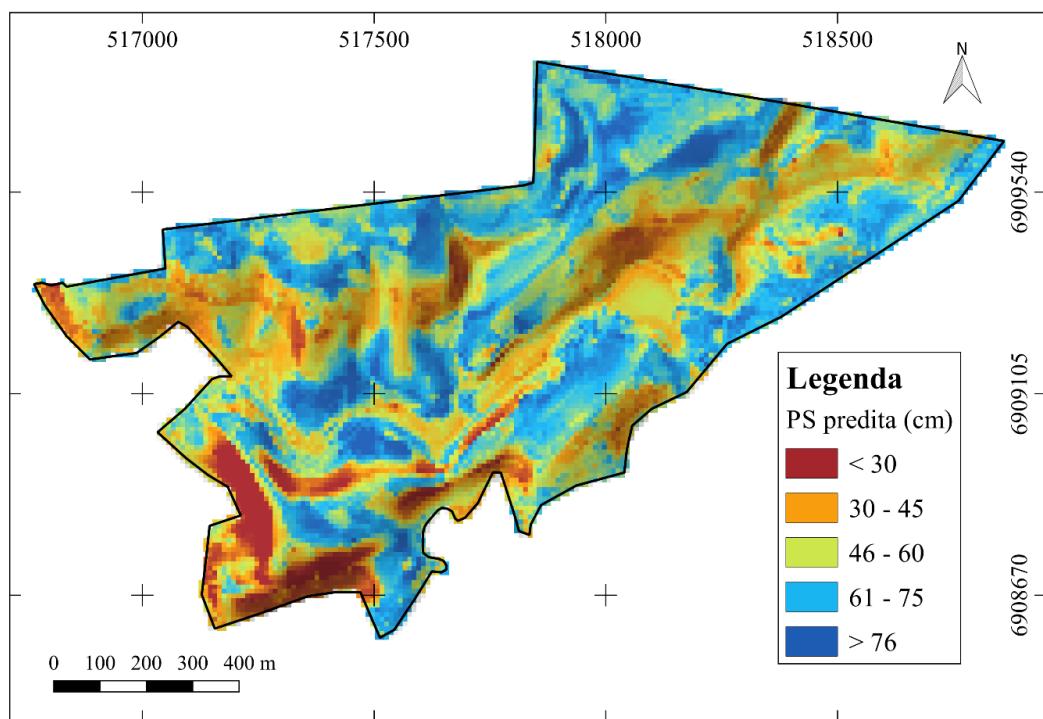
O pequeno número de amostras frente à complexidade da paisagem pode justificar as dificuldades inerentes à calibração e validação dos modelos de predição de PS no presente estudo. Além disso, considerando a complexidade envolvida na distribuição espacial da profundidade do solo, essa variável do solo é citada por Michel e Kobiyama (2015b) com uma das variáveis físicas menos compreendidas pela comunidade científica.

Considerando que a FPS gerada pelo modelo RF para PS apresentou acurácia superior à RLM, foi realizada a predição espacial utilizando o modelo RF. Sendo a declividade a variável de maior importância na construção das FPS (Figura 13AB) o mapa de declividade foi utilizado com suporte para discussão (Figura 15).

Conforme o mapa da PS, valores maiores que 61 cm (Figura 14) foram preditos em locais com declividades menores que 8 % (Figura 15). Já em declividades superiores a 20 % são observadas predições de PS menores que 46 cm e em declividades intermediárias (8 – 20 %) a PS predita ficou entre 46 – 60 cm (Figura 14).

Nas áreas mais baixa da paisagem o solo apresentou características hidromórficas, ocorrendo em regiões de baixa ELEV, baixa DECLI, maior TWI, normalmente associadas à drenagem fechada, sendo observada a classe dos Gleissolos Melânicos. Essas áreas recebem maior volume de água, decorrente do escoamento das áreas mais altas adjacentes. Assim a quantidade de água por unidade de área aumenta em função da diminuição do declive, devido ao suprimento de água adicional. Ainda, à medida que a CA aumenta, o teor de umidade do solo também aumenta. Em disso, ocorre o acúmulo de água e esses solos normalmente são rasos ou moderadamente profundos, consequência do fluxo de água impedido, que diminui a velocidade de percolação de água no solo e retarda o seu desenvolvimento.

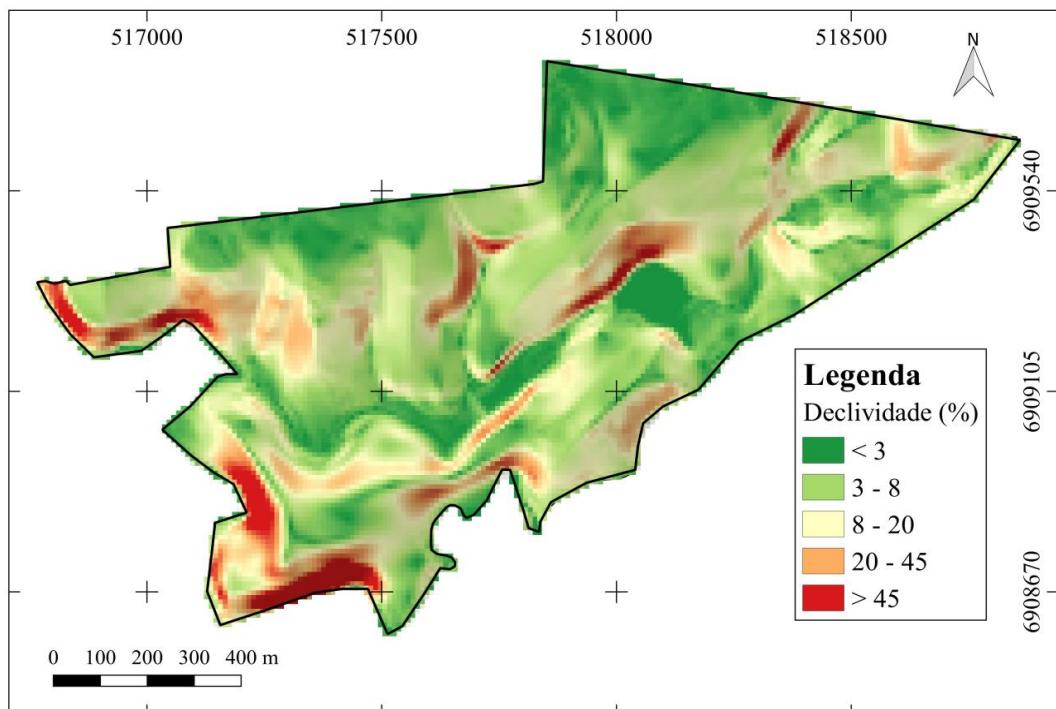
Figura 14 - Mapa de predição da PS a partir do mapeamento digital do solo baseado no modelo RF



Fonte: Autor

Em que OS: profundidade do solum.

Figura 15 - Mapa de declividade



Fonte: Autor.

Essa relação da PS com a declividade é devido aos processos de perda e adição que atuam sobre a gênese do solo nessas paisagens (MOORE et al., 1993; BUOL et al., 2011). Em regiões mais declivosas a infiltração de água no perfil é reduzida, consequentemente o processo de escoamento e perda aumenta, influenciando no desenvolvimento de um perfil de solo menos profundo. A ocorrência de perdas nas áreas mais altas e declivosas resultam na formação das áreas de acúmulo (ou adição) à medida que a declividade diminui, refletindo no aumento da PS e espessura do horizonte superficial, como observado no mapa de EA (Figura 17).

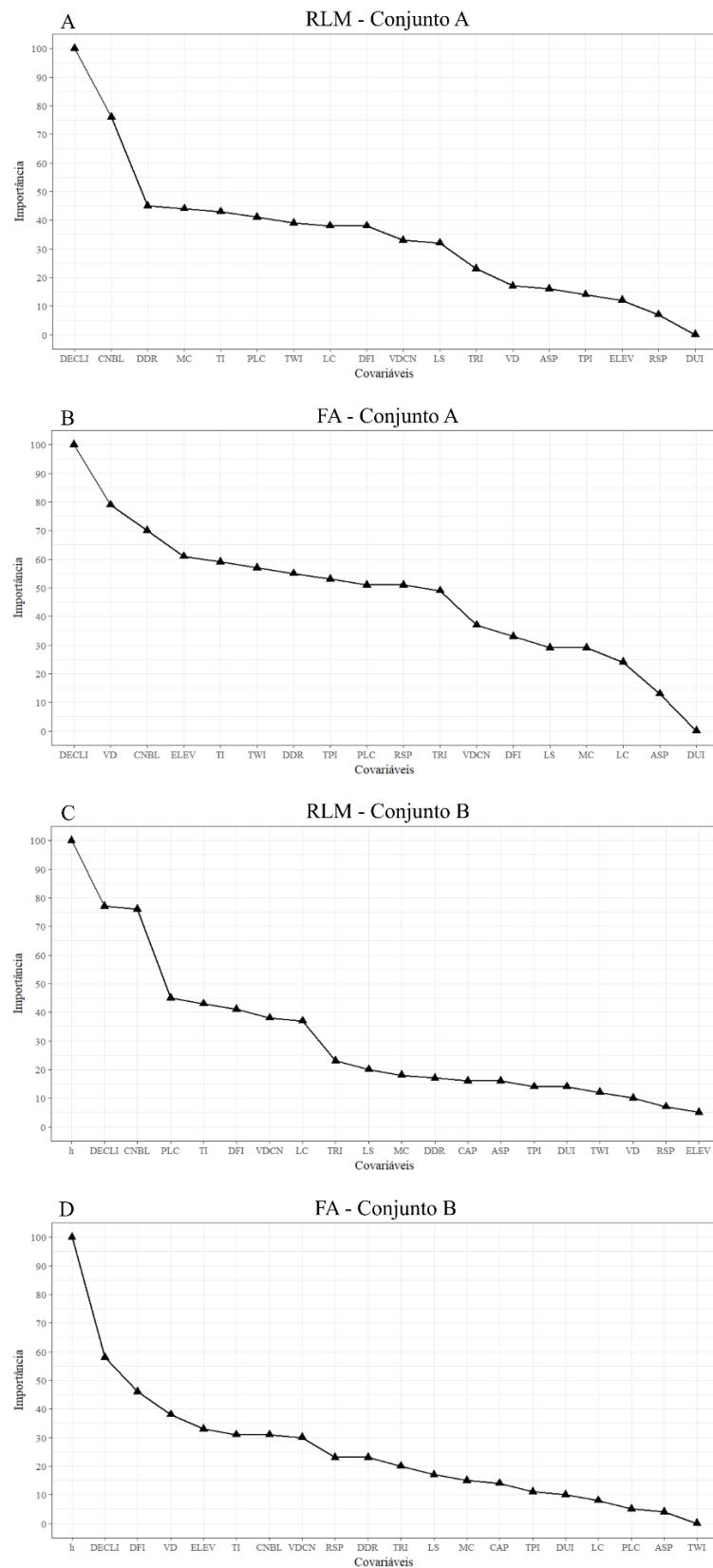
5.5.2. Predição da EA

As FPS construídas para EA apresentaram comportamento semelhante a PS, com R^2_v variando entre 0,11 e 0,20 e RMSE_v entre 9,33 e 13,25 cm. Assim como na predição de PS, as PFS treinadas com o conjunto A (variáveis topográficas) apresentaram valores de R^2_t inferiores ao conjunto B (variáveis topográficas e dendrométricas).

O modelo RF apresentou o melhor desempenho no treinamento nos conjuntos A e B, com R^2_t de 0,92 e 0,46 respectivamente. Na validação apresentaram R^2_v de 0,15 e 0,20 (Tabela 10). Esse erro representa aproximadamente 35% da média da EA na área de estudo (Tabela 8). Utilizando um conjunto de dados consideravelmente maior (310 amostras) as relações estabelecidas no estudo de Tsai et al. (2001), entre ELEV, DECLI, ASP como preditoras da EA resultaram em uma acurácia inferior ao presente estudo com $R^2_v= 0,01$ e RMSE_v= 12,17 cm.

Quando os modelos foram treinados com o conjunto A as variáveis mais importantes foram em ordem decrescente a DECLI, VD, CNBL, ELEV, TI e TWI para o modelo RF (Figura 16), dada a correlação e contribuição destas variáveis na variação da EA (Tabela 8). Já para o modelo RLM as variáveis importantes foram DECLI, CNBL, MC, TI e TWI. Estas variáveis selecionadas em ambos os modelos estão relacionadas com o volume de água que percola no perfil, a taxa dos processos de perda e adição de sedimentos, condições de drenagem e distribuição da energia potencial da água na paisagem, refletindo diretamente nos processos erosivos associados à DECLI (BHERING et al., 2016; PRATES et al., 2012) e consequentemente na gênese do solo (BUOL et al., 2011), e na variação da PS e EA na paisagem.

Figura 16 - Escala de importância de variáveis preditoras da espessura do horizonte A (A) conjunto A e (B) conjunto B



Fonte: Autor.

Em que: PS: profundidade do solum, EA: espessura do horizonte A, DAP: circunferência a altura do peito, h: altura das árvores, LS: fator LS, DECLI: declividade, TPI: índice de posição topográfico, TRI: índice de rugosidade do terreno, TWI: índice de umidade topográfico, VD: profundidade do vale, VDCN: distância vertical da rede de drenagem, AH: sombreamento do relevo, ASP: aspecto, CA: área de captação, CIN: índice de convergência, CNBL: canal base da rede de drenagem, DUI: duração da insolação e ELEV: elevação.

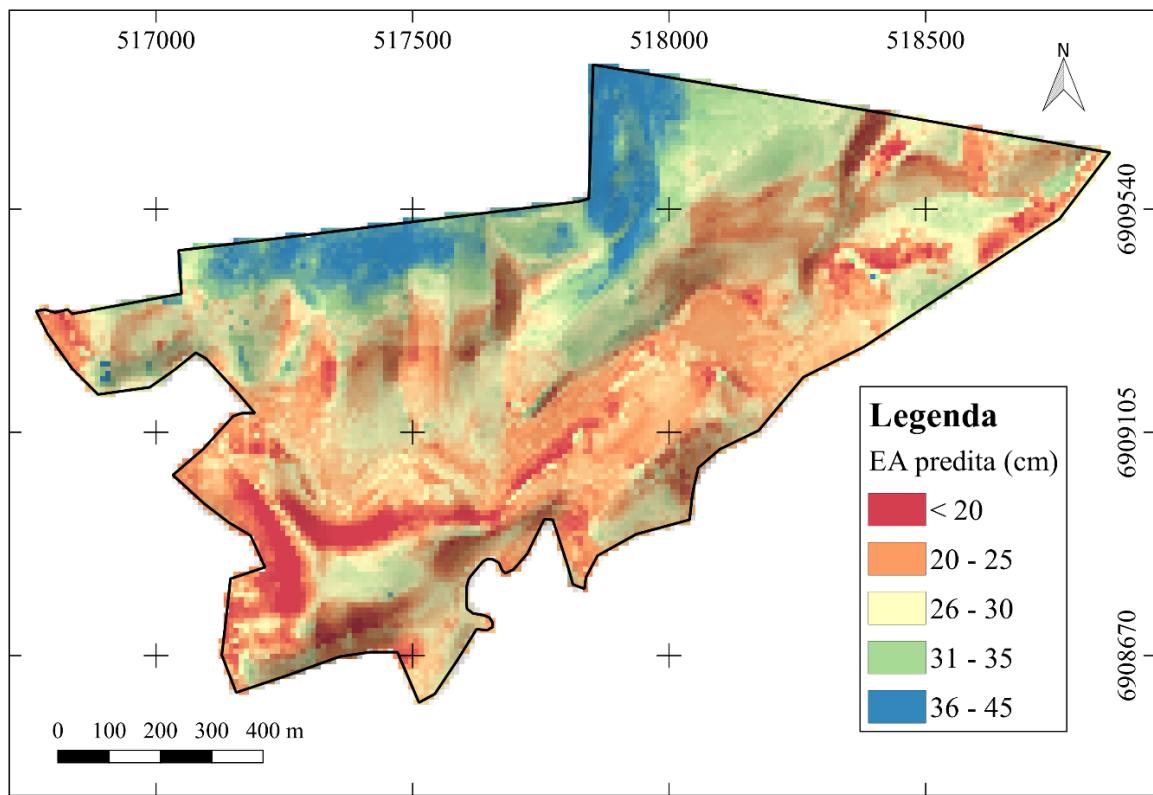
É possível notar um comportamento semelhante ao observado na PS em relação ao grau de importância das variáveis RSP e VD para os modelos RF e RLM, sendo elas importantes no modelo RF e pouco importantes no modelo RLM (Figura 16). O que pode estar relacionado ao comportamento não linear entre essas variáveis e a EA.

Ao serem treinados com o conjunto B, os modelos apresentaram a variável h seguida da CAP e DECLI como as de maior importantes para a predição (Figura 16CD). A adição da h e CAP como preditoras da EA fez o R^2_v passar de 0,11 no conjunto A para 0,19 no conjunto B com o modelo RLM, reduzindo o RMSE cerca de 1,5 cm (Tabela 10). Já no modelo por RF o R^2_v passou de 0,15 para 0,20, com redução mais significativa do RMSE de 11,75 para 9,33 cm (Tabela 10). A DECLI manteve-se com importância elevada, realçando mais uma vez sua estreita relação com a camada superficial do solo.

Os solos com EA maiores (Figura 17) estão relacionados a locais mais elevados associados a baixas declividades (Figura 15). Tais condições proporcionam maior infiltração de água no solo e redução da magnitude do processo de perda, o que melhora a taxa de desenvolvimento de pedogenético (BUOL et al., 2011). Já em locais de maior declividade ($> 45\%$) são observadas predições de solos com EA menores que 20 cm (Figura 17). Por outro lado, a medida que a declividade diminui, variando de 8 a 20 % (Figura 15), a EA passa a variar entre 20 a 35 cm (Figura 17).

Além da relação da declividade nestes processos de perda e adição, esta variável possui estreita relação com a umidade do solo. Quando os fluxos desaceleram (diminuição da declividade), a umidade é maior, e quando os fluxos se aceleram (aumento da declividade), a umidade passa a ser menor. Esses fatos explicam a correlações do TWI com a DECLI, TRI e CA na área, conforme dados apresentados anteriormente (Tabela 9). Além disso, considerando que o TWI apresenta a tendência de uma célula acumular água e que maiores valores de TWI indicam maior conteúdo de água no solo, essa variável indica um papel fundamental na formação de zonas de saturação no solo. Sendo a água o principal agente condicionante do intemperismo, a quantidade de água que percola no perfil tem uma relação direta com a PS e na EA, sendo isso demonstrado na importância destacada pela FPS de EA para o TWI (Figura 16AB).

Figura 17 - Mapa de predição da EA a partir do mapeamento digital do solo baseado no modelo RF



Fonte: Autor

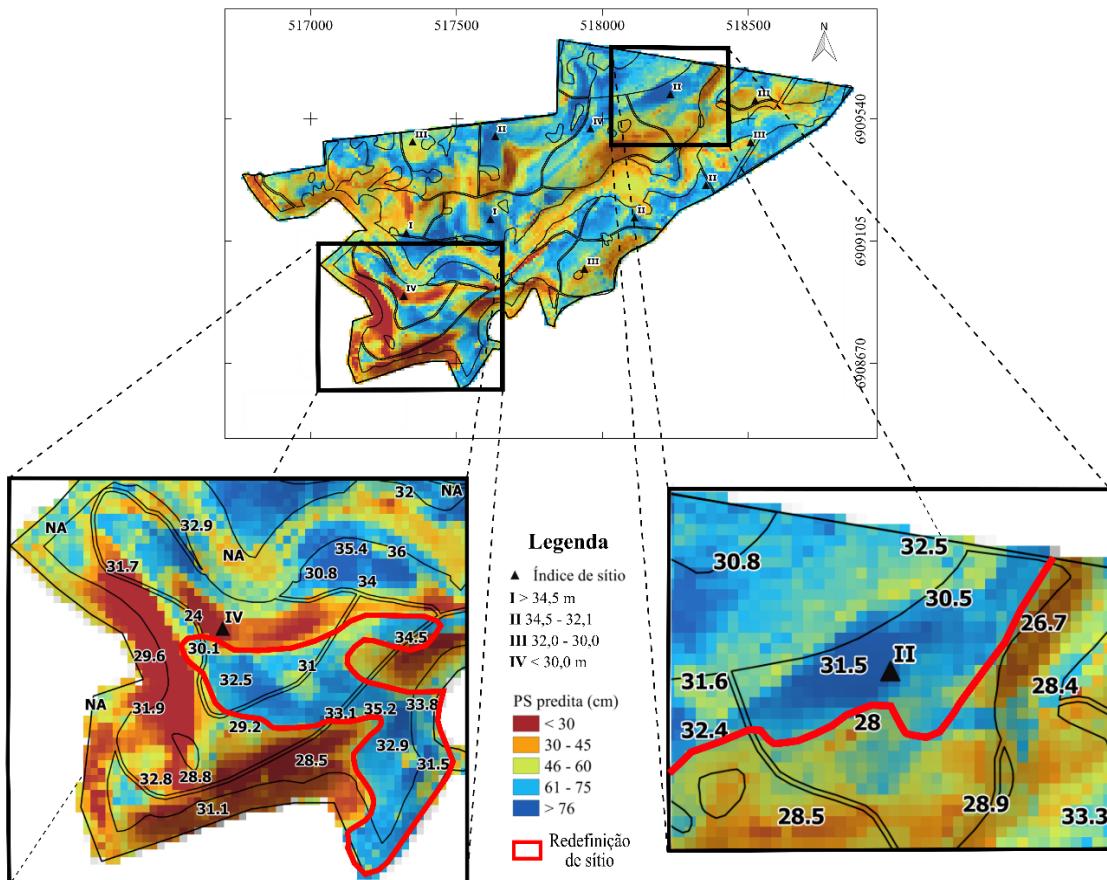
Em que EA: espessura do horizonte A.

5.5.3. Sugestão de aplicação das previsões no setor florestal

A predição espacial de variáveis do solo relacionadas a variação dos parâmetros dendrométricos nos permite estabelecer correlações capazes de auxiliar na prática da silvicultura. Isso demonstra a importância do estudo detalhado das variáveis pedológicas que interferem sobre o crescimento da cultura no sentido de delimitar e aplicar essas informações com o crescimento da floresta, dando uma nova aplicabilidade ao MDS e seus produtos.

Sendo as variações dendrométricas sensíveis às variações da PS, ao observar o exemplo de aplicação na figura 18, é possível observar a grande variabilidade de PS dentro de um único talhão, onde um único valor de índice de sítio, oriundo de uma parcela (PIC), é utilizado para o manejo e planejamento florestal no inventário da sua capacidade produtiva.

Figura 18 - Mapa de predição da PS com a delimitação de áreas produtivas e os índices de produtividade de sítio das parcelas de inventário contínuo, conforme a altura das árvores em metros.



Fonte: Autor.

Neste caso, a definição de áreas homogêneas a partir do MDS pode contribuir para o planejamento amostral do povoamento. Dentre as vantagens está a possível definição do número ideal de amostra e alocação das PIC visando uma melhor representatividade e uma diminuição dos custos com PIC não representativas. Além disso, é possível obter informações precisas e com menor custo possível a fim de subsidiar o planejamento florestal no direcionamento de recursos para o manejo de florestas e silvicultura de precisão.

6. CONCLUSÕES

As características físicas e morfológicas do solo prevalecem sobre as químicas na correlação com os parâmetros dendrométricos, sendo a profundidade do solum e a espessura do

horizonte superficial as principais condicionantes da variação de diâmetro e altura. Entre as variáveis topográficas, a elevação e a distância vertical da rede de drenagem foram as principais condicionantes.

O melhor resultado de predição foi obtido com o modelo random forest que apresentou $R^2= 0,25$ e RMSE de 30,23 cm na predição da profundidade do solum e $R^2= 0,15$ e RMSE= 11,75 cm na predição da espessura do horizonte A.

Os resultados encontrados no presente estudo confirmaram a hipótese que a produtividade de *Pinus taeda* L. é influenciada pelas variáveis pedológicas, e que estas informações são passíveis de serem preditas utilizando o MDS e utilizadas no planejamento florestal.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKUMU, C. E., WOODS, M., JOHNSON, J. A., PITT, D. G., UHLIG, P., & MCMURRAY, S. GIS-fuzzy logic technique in modeling soil depth classes: Using parts of the Clay Belt and Hornepayne region in Ontario, Canada as a case study. *Geoderma*, v. 283, p. 78-87, 2016.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v.22, n.6, 711-728, 2013.
- ANDRADE, FA; MENDONÇA-SANTOS, ML. Predição da fertilidade do solo do polo agrícola do Rio de Janeiro por meio de modelagem solo x paisagem. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.51, n.9, p.1386-1395, set. 2016.
- ARRUDA, G.P.; DEMATTÊ, J.A.M; CHAGAS, C.S. Mapeamento digital de solos por redes neurais artificiais com base na relação solo-paisagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.37, p.327-338, 2013.
- BARBOSA, C.E.M., FERRARI, S., CARVALHO, M.D.P., PICOLI, P.R.F., CAVALLINI, M.C., BENETT, C.G.S., SANTOS, D.M.A.D. Inter-relação da produtividade de madeira do pinus com atributos físico-químicos de um latossolo do cerrado brasileiro. *Revista Árvore*, p. 25-35, 2012.
- BAYER, C; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica: In: SANTOS, GA; CAMARGO, FAO (Ed.). Matéria orgânica do solo: fundamentos e caracterização. Porto Alegre: Gênesis, 1999. P. 9-26.
- BEH, J. L., KANOWSKI, P. J., GREENE, R. S., & BRACK, C. L. Predicting soil depth using simple ground-based measurements of stem shape and taper in the butt swell section of individual *Pinus radiata* trees. *Australian Forestry*, v. 79, n. 2, p. 114-121, 2016.
- BEHRENS T, ZHU AX, SCHMIDT K, SCHOLTEN T. Multi-scale digital terrain analysis and feature selection for digital soil mapping. *Geoderma*, 155:175–185, 2010.
- BEHRENS, T.; SCHOLTEN, T. A comparison of data-mining techniques in predictive soil mapping. In: LAGACHERIE, P; MCBRATNEY, A.B.; VOLTZ, M (Ed), Digital Soil Mapping, an introductory perspective. *Developments in soil science*, vol. 31, p. 353-364, 2007.
- BELLOTE, A.F.J.; DEDECEK, R.A. Atributos Físicos e Químicos do Solo e suas Relações com o Crescimento e a Produtividade do *Pinus taeda*. (Boletim de Pesquisa Florestal, 53). Colombo: Embrapa Florestas, 2006. p.21-38. 2006.
- BERTALOT, M. J. A.; GUERRINI, I. M.; MENDOZA, E.; DUBOC, E.; BARREIROS, R. M.; CORRÊA, F. M. Retorno de nutrientes ao solo via deposição de serapilheira de quatro espécies leguminosas arbóreas na região de Botucatu-SP. *Scientia Forestalis*, v.65, 2004.
- BHERING, S. B.; DA SILVA CHAGAS, C.; DE CARVALHO JÚNIOR, W.; PEREIRA, N. R.; CALDERANO FILHO, B.; PINHEIRO, H. S. K. Mapeamento digital de areia, argila e carbono orgânico por modelos Random Forest sob diferentes resoluções espaciais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, n. 9, p. 1359-1370, 2016.

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**, v. 30, n. 61, p. 37, 2010.

BOGNOLA, I. A.; JUNIOR, P. J. R.; DA SILVA, E. A. A.; LINGNAU, C.; HIGA, A. R. Modelagem uni e bivariada da variabilidade espacial de rendimento de *Pinus taeda* L. **Floresta**, v. 38, n. 2, 2008.

BOGNOLA, I.A. Unidades de Manejo para *Pinus taeda* L. no planalto norte catarinense, com base em características do meio físico. Curitiba, 2007. 160 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

BOTREL, R. T.; OLIVEIRA FILHO, A. T.; RODRIGUES, L. A.; CURI, N. Influência do solo e topografia sobre as variações da composição florística e estrutura da comunidade arbóreo-arbustiva de uma floresta estacional semidecidual em Ingaí, MG. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 25, p. 195-213, 2002.

BRADY, N. C. Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos/Nyle C. Brady, Ray R. Weil; tradução técnica: Igo Fernando Lepsch. 2013.

BRAGA, A.J.T., DE LIMA, E.E.; MARTINS, S. V. Influência dos fatores edáficos na variação florística de Floresta Estacional Semidecidual, em Viçosa, MG. **Revista Árvore**, v.39, n.4, p.623-633, 2015.

BREIMAN, L. Random forests. **Machine learning**, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001.

BUOL, SW; SOUTHARD RJ; GRAHAM RC; McDANIEL, PA. Soil genesis and classification. John Wiley; Sons, 6th ed, 2013.

BURGER, D. **Ordenamento Florestal**. A produção Florestal Curitiba: FUPEF, 1980. 124.

CALDEIRA, M.V.W.; TONINI, H.H.; HOPPE, J.M.; WATZLAWICK, L. F.; SELLE, G. L. Definição de sítios em povoados de *Pinus elliottii* Engelm. na região de Encruzilhada do Sul, RS. **Ciência Florestal**, v. 6, n. 1, p. 1-13, 1996.

CALDERANO FILHO, B. et al. Artificial neural networks applied for soil class prediction in mountainous landscape of the serra do mar 2014.

CALGARO, H.F. Distribuição natural de espécies arbóreas em áreas com diferentes níveis de antropização e relação com os atributos químicos do solo. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.39, n.2, p.233-243, 2015.

CAMPOS, R. F. F.; DE OLIVEIRA, L. P.; SCHVEITZER, B. Tolerância do *Pinus taeda* inoculado com fungos ectomicorrizicos (fECM), sob diferentes concentrações de cobre. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 10, n. 2, p. 512-520, 2017.

CARVALHO JÚNIOR, W.; CHAGAS, C.S.; MUSELLI, A.; PINHEIRO, H.S.K.; PEREIRA, N.R.; BHERRING, S.B. Método do hipercubo latino condicionado para a amostragem de solos

na presença de covariáveis ambientais visando o mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.386-396, 2014.

CASTELO, P.A.R.; MATOS, J.L.M. de; DEDECEK, R.A.; LAVORANTI, O.J. Influência de diferentes sítios de crescimento sobre a qualidade da madeira de *Pinus taeda*. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 38, n. 3, 2008.

CHAGAS, CS; FERNANDES FILHO, EI; VIEIRA, CAO; SCHAEFER, CEGR; CARVALHO JUNIOR, W. Atributos topográficos e dados do Landsat7 no mapeamento digital de solos com uso de redes neurais. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.45, n.5, p.497-507, maio 2010.

CHAVES; CORREIA, Micronutrientes no sistema solo-Pinus caribaea Morelet em plantios apresentando amarelecimento das acículas e morte de plantas R. *Árvore*, Viçosa-MG, v.27, n.6, p.769-778, 2003.

COELHO, M.R.; FONTANA, A.; SANTOS, H.G.; PEREZ, D.V. O solo e a sustentabilidade agrícola no brasil: um enfoque pedológico. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Solos e Sociedade*, v.39, n.3, 2014.

CONFORTI, M.; FROIO, R.; MATTEUCCI, G.; BUTTAFUOCO, G. Visible and near infrared spectroscopy for predicting texture in forest soil: an application in southern Italy. **iForest** 8: 339-347 2015.

CONRAD, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., and Böhner, J. (2015): System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, *Geosci. Model Dev.*, 8, 1991-2007, doi:10.5194/gmd-8-1991-2015.

CORREIA, J.R.; COSTA, L.D.; NEVES, J.C.; CRUZ, C.D. Análise de trilha ("Path analysis") no estudo do relacionamento entre características físicas e químicas do solo e a produtividade do *Pinus*. **Revista Árvore**, v.22, n.2, p.161-169, 1996.

COSTA, M.D.; PEREIRA, O.L.; KASUYA, M.C.M.; BORGES, A.C. Ectomicorras: A face oculta das florestas – aplicações biotecnológicas das ectomicorras na produção florestal. *Biotec. Ci. Desenvol.*, 29:38-46, 2003.

SBCS – Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul. Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, 2016. 376p.

DALMOLIN, R. S. D.; TEN CATEN, A. Mapeamento Digital: nova abordagem em levantamento de solos. **Investigación Agraria**, v. 17, n. 2, p. 77-86, 2015.

DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; PEDRON, F.A; AZEVEDO, A.C. Relação entre as características e o uso das informações de levantamentos de solos de diferentes escalas. **Ciência Rural**, v.34, p.1479-1486, 2004.

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 química do solo. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 38, n. 3, 2008.

DICK, G; SCHUMACHER, M.V. Relações entre solo e fitofisionomias em florestas naturais. **Ecologia e Nutrição Florestal**, Santa Maria-RS, v.3, n.2, p.31-39, mai./ago., 2015.

DOLDAN, M.E.Q. Desenvolvimento da altura dominante de *Pinus taeda* L. como resposta aos estímulos dos fatores do meio, na região de Ponta Grossa. **Floresta**, Curitiba, v. 20, n. 1 e 2, p. 54-55. 1990.

DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B. de; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G; VIANA, J.H.M. **Manual de métodos de análise de solos**. ed. 2. rev., Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

DOTTO, A.C.; DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F.A.; TEN CATEN, A.; RUIZ, L.F.C. Mapeamento digital de atributos: granulometria e matéria orgânica do solo utilizando espectroscopia de reflectância difusa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1663-1671, 2014.

FAO, IFAD and WFP. 2015. The State of Food Insecurity in the World 2015. Meeting the 2015 international hunger targets: taking stock of uneven progress. Rome, FAO.

FERREIRA, C. A.; SILVA, H. D. da; REISSMAN, N, C. B.; BELLOTE, A. F. J.; MARQUES, R. Nutrição de pinus no sul do Brasil. Colombo: Embrapa Florestas, 2001. 23 p. (Documentos, n. 60).

FERREIRA, MM. Caracterização física do solo. Física do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 1-27, 2010.

FERREIRA, R.L.C.; LIRA JUNIOR, M.A.; ROCHA, M.S.; SANTOS, V.F.; LIRA, M.A.; BARRETO, L.P. Deposição e Acúmulo de Matéria Seca e Nutrientes em Serapilheira em um Bosque de Sabiá (*Mimosa Caesalpiniifolia* Benth.) **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.31, n.1, 2007.

FILHO, E.P; MORA, A. L ; MAESTRI, R. Interação de genótipos de *Pinus taeda* L. com locais no Sul-Sudeste do Brasil. **Cerne**, v.7, n.1, p.090-100, 2001.

FLORINSKY, Igor. **Digital terrain analysis in soil science and geology**. Academic Press, 2016.

GALLANT, J. C.; WILSON, J. P. Primary topographic attributes. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (Eds.). **Terrain Analysis: Principles and applications**. New York: John Wiley, 2000. p. 51-85.

GATEADOS. Plano de manejo florestal, resumo público, 2016. Disponível em: <<http://gateados.com.br/novo/Resumo.pdf>> Acesso em: 2017.

GOMES, J. B. V.; BOGNOLA, I. A., STOLLE, L.; DOS SANTOS, P. E. T.; MAEDA, S., DA SILVA; L. T. D. M., ... ; DE CASTRO ANDRADE, G. Unidades de manejo para pinus: desenvolvimento e aplicação de metodologia em áreas de produção no oeste catarinense. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 109, p. 191-204, 2016.

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

GONÇALVES, J.L.M.; MOREIRA, M.R.; MENDES, J.C.T.; GAVA, J.L. Mapeamento de solos e da produtividade de plantações de Eucalyptus grandis, com uso de sistema de informação geográfica. **Scientia Forestalis**, v.40, n.94, p.187-201, 2012.

GRUNWALD, S. Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches. **Geoderma**, v.152, p.195-207, 2009.

HAIR, J.F.; BLACK, W. C.; BABIN, B.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L. **Análise multivariada de dados**. Tradução: Adonai Schlup Sant'Anna. – 6 ed. – Porto Alegre: Bookman, 2009. 688p.

HENGL T, MENDES DE JESUS J, HEUVELINK GBM, RUIPEREZ GONZALEZ M, KLIBARDA M, BLAGOTIĆ A, et al. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. PLoS ONE 12(2): e0169748, 2017.

HENGL, T.; DE JESUS, J. M.; MACMILLAN, R. A.; BATJES, N. H.; HEUVELINK, G. B.; RIBEIRO, E.; ... ; GONZALEZ, M. R. SoilGrids1km—global soil information based on automated mapping. PLoS One, v. 9, n. 8, p. e105992, 2014.

HENGL, T.; HEUVELINK, G. B.; KEMPEN, B.; LEENAARS, J. G.; WALSH, M. G.; SHEPHERD, K. D.; ...; TONDOH, J. E. Mapping soil properties of Africa at 250 m resolution: random forests significantly improve current predictions. PloS one, v. 10, n. 6, p. e0125814, 2015.

HENGL, T.; ROSSITER, D. G. Supervised Landform Classification to Enhance and Replace Photo-Interpretation in Semi-Detailed Soil Survey. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 67, n. 6, p. 1810, 2003.

HEUVELINK, G. The definition of pedometrics. Pedometron, v.15, p.11-12, 2003.

HUDSON, B.D. The soil survey as paradigm-based science. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p.836-841, 1992.

IBA. Anuário estatístico da IBA 2016: Ano base 2015. Brasília: 2016. <http://iba.org/images/shared/iba_2016.pdf>.

JENNY, H. **Factors of soil formation - a system of quantitative pedology**. New York: Dover Publications, 1941. 281p.

KÄMPF, N.; CURI, N. Conceito de solo e sua evolução histórica. **Pedologia: Fundamentos**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa-MG, p. 343, 2012.

KILCA, R., PEDRON, F. A.; SCHWARTZ, G.; LONGHI, J. S.; DEOBALD, G. A. Mudanças no solo em cronossequências da floresta estacional subtropical no sul do Brasil. **Ciência Rural**, v. 45, n. 12, p. 2174-2180, 2015.

KOTCHETKOFF-HENRIQUES, O.L.G.A.; JOLY, C.A.; BERNACCI, L. C. Relação entre o solo e a composição florística de remanescentes de vegetação natural no Município de Ribeirão Preto, SP. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 28, n. 3, p. 541-562, 2005.

KRONKA, F. J. N. et al. A Cultura do Pinus no Brasil. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2005.

KURIAKOSE, S. L.; DEVKOTA, S.; ROSSITER; JETTEN, V. G. Prediction of soil depth using environmental variables in an anthropogenic landscape, a case study in the Western Ghats of Kerala, India. **Catena**, v.79, p.27–38, 2009.

LACOSTE, M.; MULDER, V.L.; RICHER-DE-FORGES, A.C.; MARTIN, M.P.; ARROUAYS, D. Evaluating large-extent spatial modeling approaches: A case study for soil depth for France. **Geoderma Regional**, v.7, p.137–152, 2015.

LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A.B.; VOLTZ, M. (Eds.). **Digital soil mapping - an introductory perspective**. Amsterdam: Elsevier, 2006. p.3-22.

LAGACHERIE, P; MCBRATNEY, AB. Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. In: LAGACHERIE, P. et al. (Ed.). Digital soil mapping: an introductory perspective. Elsevier. v.31, p.3-24, 2007.

LEPSCH, I.F.; ESPÍNDOLA, C.R. VISCHI FILHO, OJ, HERNANI, LC; SIQUEIRA, D. Manual para levantamento utilitário e classificação de terras no sistema de capacidade de uso. 1^a Edição. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.170 p.

LOPES, V.G.; SCHUMACHER, M.V.; MÜLLER, I., CALIL, F.N.; WITSCHORECK, R.; LIBERALESSO, E. Variáveis físicas e químicas do solo importantes na distribuição de raízes finas em um povoamento de *Pinus taeda* L. no nordeste do Rio Grande do Sul. **Revista Ecologia e Nutrição Florestal-ENFLO**, v.1, n.1, p.14-23, 2014.

LOPES, V.G; SCHUMACHER, MV; CALIL, FN; VIEIRA, M; WITSCHORECK. 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, out.-dez., 2010.

LORENZI, H. et al. Árvores exóticas no Brasil. Madeireiras, ornamentais e aromáticas. Nova Odessa: Instituto Plantarum. 339 p. 2003.

MARCHIORI, J.N.C. Dendrologia das gimnospermas. Santa Maria: Ed. UFSM, 1996.

MCBRATNEY, A., FIELD, D.J., KOCH, A. The dimensions of soil security. **Geoderma**, v.213, p.203–213, 2014.

MCBRATNEY, A.B.; MENDONÇA-SANTOS, M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v.117, p.3-52, 2003.

MEHNATKESH, A., AYOUBI, S., JALALIAN, A., & SAHRAWAT, K. L. Relationships between soil depth and terrain attributes in a semi arid hilly region in western Iran. **Journal of Mountain Science**, v. 10, n. 1, p. 163, 2013.

MENDONÇA-SANTOS, M.L.; SANTOS, H.G. **Mapeamento Digital de Classes e Atributos de Solos**. Embrapa. 2003.17p.

MENEZES, M.D.; SILVA, S.H.G.; MELLO, C.R.; OWENS, P.R.; CURI, N. Solum depth spatial prediction comparing conventional with knowledge-based digital soil mapping approaches. **Sci. Agric.** v.71, n.4, p.316-323, 2014.

MENEZES, M.D.; SILVA, S.H.G.; OWENS, P.R.; CURI, N. Digital soil mapping approach based on fuzzy logic and field expert knowledge. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 37, n. 4, p. 287 - 298, 2013.

MICHEL, G. P., KOBIYAMA, M. Estimativa da profundidade do solo: Parte 1 – Métodos de campo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.8, n.4, p. 1206-1224, 2015.

MICHEL, G. P., KOBIYAMA, M. Estimativa da profundidade do solo: Parte 2 – Métodos matemáticos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.8, n.4, p.1225-1243, 2015.

MINASNY, B.; McBRATNEY, A.B. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. **Comput. Geosci.**, 32:1378-1388, 2006.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.B.; SALVADOR-BLANES, S. Quantitative models for pedogenesis — a review. **Geoderma**, v.144, p.140–157, 2008.

MINASNY, B; MCBRATNEY, AB. Incorporating taxonomic distance into spatial prediction and digital mapping of soil classes. **Geoderma**, 142(3):285–293, 2007.

MOORE, I. D.; GEISSLER, P. E.; NIELSEN, G. A; PETERSON, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, p. 443-452, 1993.

MORALES, C.A.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; ALMEIDA, J.A.; MARANGONI, J.M.; JAMES, S.; CHAVES, D.M. Qualidade do solo e produtividade de *Pinus taeda* no planalto catarinense. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 629-640, 2010.

MORALES, S.A.S. Relação Entre Atributos do solo com a Produtividade de *Pinus taeda*. Dissertação Lages, p.133, 2007;

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O.; BRUSSAARD, L. **Biodiversidade do solo em ecossistemas brasileiros. 2008** Lavras: Universidade Federal de Lavras - ISBN 9788587692504 - 768 p.

MORENO; SCHIAVINI. Vegetação e solo em um gradiente florestal. **Revta brasil. Bot.**, São Paulo, V.24, n.4, p.537-544, dez. 2001.

MOURA-BUENO, J. M. **Modelos digitais de elevação e predição do carbono orgânico do solo no planalto do estado do Rio Grande do Sul.** 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

MUNHOZ, JSB. **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.** Tese. Recursos Florestais: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2015.

OLARIETA, J. R.; BESGA, G.; RODRÍGUEZ - OCHOA, R.; AIZPURUA, A.; USÓN, A. Land evaluation for forestry: a study of the land requirements for growing Pinus radiata D. Don in the Basque Country, northern Spain. *Soil use and management*, v. 22, n. 3, p. 238-244, 2006.

ORTIZ, J.L.; VETTORAZZI, C.A.; DO COUTO, H.T.Z.; DE MORAES GONÇALVES, J. L. Relações espaciais entre o potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo. *Scientia Florestalis*, n. 72, p. 67-79, 2006.

PAIVA, GY., SILVA, R. K., PEZZOPANE, J.E.M., ALMEIDA, Q. A, CECÍLIO, A.R. Delimitação de sítios florestais e análise dos fragmentos pertencentes na bacia do rio Itapemirim. *Idesia (Arica)*, v. 28, n. 1, p. 17-22, 2010.

PASSOS-CARVALHO, M., DE MENDONÇA, V. Z., PEREIRA, F. C. B. L., ARF, M. V., KAPPES, C.,; DALCHIAVON, F. C. Produtividade de madeira do eucalipto correlacionada com atributos do solo visando ao mapeamento de zonas específicas de manejo. *Ciência Rural*, v. 42, n. 10, p. 1797-1803, 2012.

PEDRON, F. A, FINK, J. R., RODRIGUES, M. F., & DE AZEVEDO, A. C. Condutividade e retenção de água em Neossolos e saprolitos derivados de Arenito. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 4, 2011.

PELISSARI, A.L.; CALDEIRA, S.F.; DOS SANTOS, V.S.; DOS SANTOS, J.O.P. Correlação espacial dos atributos químicos do solo com o desenvolvimento da teca em Mato Grosso. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 32, n. 71, p. 247-256, 2012.

PÉLLICO NETTO S.; BRENA. DA. Inventário florestal. **Curitiba: edição dos autores**, 1997.

PENÍŽEK, V.; BORŮVKA, L. Soil depth prediction supported by primary terrain attributes: a comparison of methods. *Plant, Soil and Environment*, v. 52, n. 9, p. 424-430, 2006.

PEREIRA, T.T.C.; KER, J.C.; ALMEIDA, C.C Qualidade de solos cultivados com eucalipto na região central de Minas Gerais: atributos físicos, químicos e mineralógicos. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária) Brazilian Journal of Agricultural Sciences*, v. 7, p. 706-713, 2012.

POTTER, R.O.; CARVALHO, A.P.; FLORES, C.A.; BOGNOLA, I. 2004. Solos do Estado de Santa Catarina. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 46.

PRATES, V.; SOUZA, L. C. P.; OLIVEIRA JUNIOR, J. C. de. Índices para a representação da paisagem como apoio para levantamento pedológico em ambiente de geoprocessamento. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.*, Campina Grande , v. 16, n. 4, p. 408-414, Apr. 2012 .

R Core Team (2017). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.36, p.1931-1935, Nov/Dez. 2006.

REISSMANN, C. B.; WISNIEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de *Pinus*, 2001. [on line], Disponível em: . Acesso em: 3 de agosto de 2017.

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

ROVEDDER, A.P.M., DE ALMEIDA, C. M., ARAUJO, M. M., DA SILVA TONETTO, T., SCOTTI, M. S. V. Relação solo-vegetação em remanescente da floresta estacional decidual na Região Central do Rio Grande do Sul. **Ciencia rural**, v. 44, n. 12, p. 2178-2185, 2014.

ROVEDDER, A.P.M., SUZUKI, L.E. A.S., DALMOLIN, R.S.D., REICHERT, J.M.; SCHENATO, R.B. Compreensão e aplicabilidade do conceito de solo florestal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 3, p. 519-530, jul.- set., 2013.

RUFINO, T.M.C.; THIERSCH, C.R.; FERREIRA, S.O.; KANEAGE JUNIOR, H.; FAIS, D. Uso da Geoestatística no estudo da relação entre variáveis dentrométricas de povoamentos de *Eucalyptus* sp. e atributos do solo. **Ambiência Guarapuava, PR**, v. 2, p. 83-93, 2006.

SALVADOR, S.M.; CONSENZA, C.B. ARAÚJO, E.F. Produção de serapilheira e devolução de macronutrientes em um povoamento de *Eucalyptus saligna* (F. Muell). **Ecologia e Nutrição Florestal**, v.2, n.2, p.52-62, 2014.

SAMUEL-ROSA, A; DALMOLIN, R.S.D.; MIGUEL, P. Building predictive models of soil particle-size distribution. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.422-430, 2013.

SANTOS FILHO, A.; ROCHA, H. O. Principais características dos solos que influem no crescimento de *Pinus taeda*, no segundo planalto paranaense. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, v. 9, p. 107-111, 1987.

SANTOS, H.G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3^a.ed. Brasília, DF: Embrapa; 2013.

SANTOS, R.M.M. **Planejamento e Otimização de Plantios de Pinus Taeda L. na Região Oeste do Estado de Santa Catarina, Brasil**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Centro-Oeste/UNICENTRO. Paraná, Irati, 2015.

SANTOS, W.C.; ROSOT, N.C.; ROSOT, M.A.D. Características edáficas relacionadas à produção de um povoamento de Araucaria angustifolia (Bert.) O. Kuntze. **Floresta**, Curitiba, PR, v.40, n.1, p.37-48, 2010.

SCHNEIDER, P.R.; SCHNEIDER, P.S.P. **Introdução ao manejo florestal**. [2. ed.]. Santa Maria: UFSM, FACOS, 2008. 566 p.

SCHUMACHER, M. V. **A Floresta e o solo**. Afubra – Projeto Verde é Vida. ed.3, 1999.

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, RUDI ; PISSININ, LUCAS ZANCAN ; VIERA, MÁRCIO ; BONACINA, DARLAN MICHEL ; BARBIERI, JOABEL . Comprimento e biomassa de raízes finas em uma floresta de *Pinus taeda* L. localizada em Cambará do Sul, RS. Santa Maria, RS: UFSM/FATECIENS, Departamento de Ciências Florestais, 2005. (Relatório Técnico).

SCIPIONI, M. C.; LONGHI, J. S.; BRANDELORO, C.; PEDRON, F. A.; REINERT, D. J. Análise fitossociológica de um fragmento de floresta estacional em uma catena de solos no Morro do Cerrito, Santa Maria, RS. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 3, 2012.

SCOLFORO, J. S. R. Mensuração florestal: Avaliação de produtividade florestal através da classificação do sítio. ESAL/FAEPE, Lavras, p. 451, 1993.

SCOLFORO, J. S. R. Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas. UFLA/FAEPE, Lavras, p. 451, 1998.

SHIMIZU, J.Y.; AMARAL, H.R.B. Variação entre procedências de *Pinus taeda L.* na região de Santa Maria, RS. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 14, p. 13-18, 1987.

SIGSC. Sistema de informações geográficas: Levantamento aerofotogramétrico de Santa Catarina, 2010. Disponível em: <<http://sigsc.sds.sc.gov.br/>>. Acesso em: 13/06/17.

SILVA, S.H.G.; DE MENEZES, M.D.; OWENS, P.R.; CURRI, N. Retrieving pedologist's mental model from existing soil map and comparing data mining tools for refining a larger area map under similar environmental conditions in Southeastern Brazil. **Geoderma**, v. 267, p. 65-77, 2016.

SMITH SE, READ DK. Mycorrhizal symbiosis, 2008. 3rd edn Academic Press.

SÖDERSTRÖM, M.; SOHLENIUS, G.; RODHE, L.; PIIKKI, K. Adaptation of regional digital soil mapping for precision agriculture. **Precision Agriculture**, p. 1-20, 2016.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Glossary of soil science terms 2008**. ASA-CSSA-SSSA, 2008.

STRECK, E. V., KÄMPF, N., DALMOLIN, R. S. D., KLAMT, E., NASCIMENTO, P. D., SCHNEIDER, P., ...; PINTO, L. F. S. (2008). Solos do Rio Grande do Sul. UFRGS: EMATER/RS-ASCAR.

STÜRMER, S. L. K.; DALMOLIN, R. S. D.; AZEVEDO, A. C.; PEDRON, F. A.; MENEZES, F. P. Relação da granulometria do solo e morfologia do saprolito com a infiltração de água em Neossolos Regolíticos do rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 37, n. 7, 2009.

TAIZ, L., & ZEIGER, E. Nutrição mineral. **Fisiologia vegetal**, v. 3, p. 95-113, 2004.

TEN CATEN, A. et al. An appropriate data set size for digital soil mapping in Erechim, Rio Grande do Sul, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 2. 2013.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F.D.A.; RUIZ, L.F.C.; SILVA, C.A.D. Mapeamento Digital de Solos: características da abordagem brasileira. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 11, 2012.

TESKE, R.; GIASSON, E.; BAGATINI, T. Produção de um Mapa Pedológico Associando Técnicas Comuns aos Mapeamentos Digitais de Solos com Delineamento Manual de Unidades de Mapeamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39 p. 950-959, 2015.

TIECHER, T; MARTINS, AP; PERETTO, EJS; FINK JR; SANTOS, LS; DENARDIN, LGO; TIECHER, TL. Evolução e estado da fertilidade do solo no Norte do Rio Grande do Sul e Sudoeste de Santa Catarina. Porto Alegre: UFGRS, 2016.

TISDALL, JM; OADES, JM. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, v33, 1982. <10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>

TOME JÚNIOR, J.B. 1997. Manual para interpretação de análise de solo. Guaíba, Livraria e Editora Agropecuária.

TSAI, C. C., CHEN, Z. S., DUH, C. T., HORNG, F. W. Prediction of soil depth using a soil-landscape regression model: a case study on forest soils in southern Taiwan. *Proceedings-National Science Council Republic of China Part B Life Sciences*, v. 25, n. 1, p. 34-39, 2001.

WEBSTER, R. **Quantitative spatial analysis of soil in the field**. Advances in Soil Science, New York, v.3, p.1-70, 1984.

WILFORD, J.M.; THOMAS J. Predicting regolith thickness in the complex weathering setting of the central Mt Lofty Ranges, South Australia. *Geoderma*, v.206, p.1-13, 2013.

WILSON, J.P., GALLANT, J.C., 2000. Digital terrain analysis. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), *Terrain Analysis: Principles and Applications*, pp. 1-27.

YANG, R.M.; ZHANG, G.L.; YANG, F.; ZHI, J.J.; YANG, F.; LIU, F.; ...; LI, D.C. Precise estimation of soil organic carbon stocks in the northeast Tibetan Plateau. *Scientific reports*, v. 6, 2016.

YESILONIS, I., SZLAVECZ, K., POUYAT, R., WHIGHAM, D., XIA, L.. Historical land use and stand age effects on forest soil properties in the Mid-Atlantic US. *Forest Ecology and Management*, v.370, p.83-92, 2016.

ZONTA, E., BRASIL, F. D. C., GOI, S. R., ROSA, M. D.; FERNANDES, M. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. Nutrição mineral de plantas. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 7-52, 2006.

APÊNDICES

APÊNDICE A – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO PERFIL 01

PROJETO – Gateados - Pistola

PERFIL N° – 01

DATA – 12/12/2016

CLASSIFICAÇÃO – Cambissolo Háplico Alumínico úmbrico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS – Município de Campo Belo do Sul, SC. Coordenadas UTM fuso 22S: 0517148– 6909050.

SITUAÇÃO, DECLIVIDADE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Coletado em trincheira no terço superior de encosta com aproximadamente 7% de declividade, sob floresta de Pinus.

ELEVAÇÃO – 922 metros.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Serra Geral

CRONOLOGIA – Período Cretáceo da Era Mesozoica

MATERIAL ORIGINÁRIO – Riodacito

PEDREGOSIDADE – Pouco Pedregoso

ROCHOSIDADE – Ausente.

RELEVO LOCAL – Suave ondulado.

RELEVO REGIONAL – Ondulado.

EROSÃO – Ausente

DRENAGEM – Bem drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Mata Atlântica.

USO ATUAL – Floresta de Pinus.

DESCRITO E COLETADO POR – Ricardo Simão Diniz Dalmolin, Jean Bueno, Taciara Horst, Luciano Cancian e Estelita Penteado.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- A₁** 0 – 18 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/2, úmido); franca; moderada, pequena e média blocos subangulares; firme, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição clara e plana; raízes muitas.
- A₂** 18 – 33 cm; bruno-escuro (7,5 YR 3/2, úmido); francoargilosa; moderada, média e grande blocos subangulares; firme, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição clara e plana; raízes muitas.
- B₁** 33 – 50 cm; bruno-escuro (7,5 YR 3/2, úmido), argila; moderada média e grande blocos subangulares; firme, plástico e pegajoso; transição abrupta e ondulada; raízes poucas.
- B₂** 50 – 110 cm; bruno (7,5 YR 4/3, úmido), argila; moderada, média e grande blocos subangulares; firme, plástico e pegajoso; transição gradual e plana; raízes poucas.
- Cr** 110 – 130 cm;

OBSERVAÇÕES: Presença de mais de 5% de minerais primários (1 a 2 mm) nos horizontes B1 e B2.

APÊNDICE B - CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 01

APÊNDICE C – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO PERFIL 02

PROJETO – Gateados - Pistola

PERFIL N° – 02

DATA – 12/12/2016

CLASSIFICAÇÃO – Neossolo Litólico Distroúmbrico fragmentário

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS – Município de Campo Belo do Sul, SC. Coordenadas UTM fuso 22S: 05171130– 6909026.

SITUAÇÃO, DECLIVIDADE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Coletado em trincheira no terço superior de encosta com aproximadamente 7% de declividade, sob floresta de Pinus.

ELEVAÇÃO – 905 metros.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Serra Geral

CRONOLOGIA – Período Cretáceo da Era Mesozoica

MATERIAL ORIGINÁRIO – Riodacito

PEDREGOSIDADE – Muito Pedregoso

ROCHOSIDADE – Média.

RELEVO LOCAL – Suave ondulado

RELEVO REGIONAL – Ondulado

EROSÃO – Ausente

DRENAGEM – Bem drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Mata Atlântica.

USO ATUAL – Floresta de Pinus.

DESCRITO E COLETADO POR – Ricardo Simão Diniz Dalmolin, Jean Bueno, Taciara Horst, Luciano Cancian e Estelita Penteado.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A 0 – 10/20 cm; bruno-avermelhando-escuro (5 YR 3/2, úmido); franca; moderada, pequena e média granular; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição abrupta irregular e plana; raízes muitas.

R

OBSERVAÇÕES:

- Presença de rochas pouco fraturada e biporos.

APÊNDICE D –CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 02

APÊNDICE E – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO PERFIL 03

PROJETO – Gateados - Pistola

PERFIL N° – 03

DATA – 12/12/2016

CLASSIFICAÇÃO – Cambissolo Háplico Alumínico úmbrico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS – Município de Campo Belo do Sul, SC. Coordenadas UTM fuso 22S: 0517505–6908937

SITUAÇÃO, DECLIVIDADE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Coletado em trincheira no patamar de meia encosta com declividade de 0% a 3%, sob floresta de Pinus. ELEVAÇÃO – 904 metros.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Serra Geral

CRONOLOGIA – Período Cretáceo da Era Mesozoica

MATERIAL ORIGINÁRIO – Riodacito

PEDREGOSIDADE – Ligeiramente Pedregoso

ROCHOSIDADE – Ausente.

RELEVO LOCAL – Plano.

RELEVO REGIONAL – Ondulado.

EROSÃO – Ausente

DRENAGEM – Bem drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Mata Atlântica.

USO ATUAL – Floresta de Pinus.

DESCRITO E COLETADO POR – Ricardo Simão Diniz Dalmolin, Jean Bueno, Taciara Horst, Luciano Cancian e Estelita Penteado.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- A1** 0 – 20 cm; bruno-escuro (7,5 YR 3/2, úmido); franco-argilosa; moderada, pequena e média granular; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição clara e plana; raízes abundantes.
- A2** 20 – 35 cm; bruno-escuro (7,5 YR 3/2, úmido); argila; moderada a forte, pequena média e grande blocos angulares e subangulares; friável, plástico e pegajoso; transição clara e plana; raízes abundantes.
- BA** 35 – 48 cm; bruno-escuro (7,5 YR 3/4, úmido), argila; moderada pequena e média blocos subangulares; friável, plástico e pegajoso; transição clara e plana; raízes comuns.
- B1** 48 – 74 cm; bruno (7,5 YR 4/4, úmido), argila/muito argilosa; moderada a forte, pequena média e grande blocos angulares e subangulares; firme, plástico e pegajoso; raízes poucas.
- B2** 74 – 110 cm; bruno (7,5 YR 4/5, úmido), argila/muito argilosa; forte, média e grande blocos angulares e subangulares; firme, plástico e pegajoso; raízes poucas.
- Cr** 110+

OBSERVAÇÕES: Presença de mais de 5% de minerais primários (1 a 2 mm) nos horizontes B1 e B2.

APÊNDICE F - CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 03

APÊNDICE G - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO PERFIL 04

PROJETO – Gateados - Pistola

PERFIL N° – 04

DATA – 13/12/2016

CLASSIFICAÇÃO – Neossolo Regolítico Distroúmbrico típico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS – Município de Campo Belo do Sul, SC. Coordenadas UTM fuso 22S: 0517867– 6908929.

SITUAÇÃO, DECLIVIDADE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Coletado em trincheira no terço médio inferior da encosta com aproximadamente 10% de declividade, sob floresta de Pinus.

ELEVAÇÃO – 898 metros.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Serra Geral

CRONOLOGIA – Período Cretáceo da Era Mesozoica

MATERIAL ORIGINÁRIO – Riodacito

PEDREGOSIDADE – Muito Pedregoso.

ROCHOSIDADE – Ausente.

RELEVO LOCAL – Ondulado.

RELEVO REGIONAL – Ondulado.

EROSÃO – Ausente

DRENAGEM – Bem drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta Nativa.

USO ATUAL – Floresta de Pinus.

DESCRITO E COLETADO POR – Ricardo Simão Diniz Dalmolin, Jean Bueno, Taciara Horst, Luciano Cancian e Estelita Penteado.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A 0 – 12/25 cm; bruno-avermelhando-escuro (5 YR 3/2, úmido); franca; fraca a moderada grumosa; friável, plástico e pegajoso; transição difusa e irregular; raízes muitas.

A/Cr 12/25 – 50/60; transição gradual e irregular; raízes poucas.

Cr 50/60 – 100+

APÊNDICE H - CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 04

APÊNDICE I - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO PERFIL 05

PROJETO – Gateados

PERFIL N° – 05

DATA – 12/12/2016

CLASSIFICAÇÃO – Neossolo Litólico Distrófico fragmentário

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS – Município de Campo Belo do Sul, SC. Coordenadas UTM fuso 22S: 0517950– 6909026.

SITUAÇÃO, DECLIVIDADE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Coletado em trincheira no topo de elevação com aproximadamente 10% de declividade, sob floresta de Pinus.

ELEVAÇÃO – 914 metros.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Serra Geral

CRONOLOGIA – Período Cretáceo da Era Mesozoica

MATERIAL ORIGINÁRIO – Riodacito

PEDREGOSIDADE – Extremamente Pedregoso.

ROCHOSIDADE – Ausente.

RELEVO LOCAL – Ondulado

RELEVO REGIONAL – Ondulado

EROSÃO – Ausente

DRENAGEM – Bem drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta Nativa.

USO ATUAL – Floresta de Pinus.

DESCRITO E COLETADO POR – Ricardo Simão Diniz Dalmolin, Jean Bueno, Taciara Horst, Luciano Cancian e Estelita Penteado.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A 0 – 10/15 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/3, úmido); franco-argilosa; fraca a moderada, pequena e média granular e grumosa; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição abrupta e irregular; raízes muitas.

R

OBSERVAÇÕES: Presença de blocos de rochas muito fraturadas.

APÊNDICE J - CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 05

APÊNDICE K - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO PERFIL 06

PROJETO – Gateados - Pistola

PERFIL N° – 06

DATA – 13/12/2016

CLASSIFICAÇÃO – Latossolo Vermelho-Amarelo Alumínico típico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS – Município de Campo Belo do Sul, SC. Coordenadas UTM fuso 22S: 0518083–6909575.

SITUAÇÃO, DECLIVIDADE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Coletado em trincheira em topo de elevação com declividade de 2% a 3%, sob floresta de Pinus.

ELEVAÇÃO – 933 metros.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Serra Geral

CRONOLOGIA – Período Cretáceo da Era Mesozoica

MATERIAL ORIGINÁRIO – Riodacito

PEDREGOSIDADE – Não Pedregoso.

ROCHOSIDADE – Ausente.

RELEVO LOCAL – Plano.

RELEVO REGIONAL – Plano.

EROSÃO – Ausente

DRENAGEM – Bem drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta Nativa.

USO ATUAL – Floresta de Pinus.

DESCRITO E COLETADO POR – Ricardo Simão Diniz Dalmolin, Jean Bueno, Taciara Horst, Luciano Cancian e Estelita Penteado.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- A1** 0 – 16 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/2, úmido); franco-argilosa; forte, média e grande blocos subangulares; firme, plástico e pegajoso; transição clara e gradual; raízes abundantes.
- A2** 16 – 30 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/3, úmido); franco-argilosa; forte, média e grande blocos subangulares; firme, plástico e pegajoso; transição clara e gradual; raízes muitas.
- AB** 30 – 45 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/3, úmido); franco-argilosa; moderada, média blocos subangulares; friável, ligeiramente plástico e pegajoso; transição clara e gradual; raízes poucas.
- BA** 45 – 67 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/3, úmido), argila; moderada pequena e média blocos angulares e subangulares; friável, plástico e pegajoso; transição clara e gradual; raízes raras.
- B1** 67 – 88 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/4, úmido), argila; moderada, pequena e média blocos sub-angulares; friável, plástico e pegajoso; raízes raras.
- B2** 88 – 108 cm; bruno-avermelhado (5 YR 4/3, úmido), argila / muito argilosa; moderada, pequena e média blocos subangulares; friável, plástico e pegajoso; raízes raras.
- B3** 108 – 140 cm+; bruno-avermelhado (5 YR 4/4, úmido), argila/muito argilosa; moderada, pequena e média blocos subangulares; friável, plástico e pegajoso; raízes raras.

APÊNDICE L - CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 06

Horizonte		Composição Granulométrica da Terra Fina (g/kg)			Argila dispersa em água (g/kg)	Grau de floculação (%)	Relação Silte/Argila	Ds (g/cm³)	Pt	Ma	Mi	Ksat (mm/h)
		Areia	Silte	Argila					cm³/cm³			
A ₁	0-16	56	331	614	176	71	0,5	0,77	0,71	0,2	0,51	486
A ₂	16-30	60	288	653	126	81	0,4	1	0,62	0,14	0,49	137
AB	30-45	56	301	643	149	77	0,5	0,95	0,61	0,17	0,44	150
BA	45-67	34	317	649	190	71	0,5	0,97	0,61	0,17	0,44	207
B ₁	67-88	37	304	659	223	66	0,5	0,98	0,59	0,14	0,45	60
B ₂	88-108	49	246	705	215	69	0,3	1,05	0,59	0,15	0,43	486
B ₃	108-140+	55	237	708	157	78	0,3	1,03	0,59	0,08	0,51	75

Hz.	pH H ₂ O	Complexo sortivo (cmol _c /kg ⁻¹)									V (%)	Al (%)	P (mg/kg)	MO (%)	C (g/kg)
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al ³⁺	H+Al	CTC _{ef}	CTC _{ph7}					
A ₁	4,6	5,48	3,52	0,14	0,10	9,24	5,68	16,34	14,92	24,16	38	38	7,50	7	38
A ₂	4,7	1,05	1,22	0,07	0,09	2,43	6,34	12,00	8,77	11,20	22	72	2,10	4	23
AB	4,7	0,36	0,61	0,04	0,07	1,08	6,21	11,99	7,29	8,37	13	85	0,70	2	14
BA	4,8	0,36	0,48	0,03	0,07	0,94	6,21	11,05	7,15	8,09	12	87	1,00	2	12
B ₁	4,8	0,14	0,26	0,04	0,07	0,51	5,48	10,10	5,99	6,50	8	91	1,40	2	10
B ₂	4,8	0,18	0,21	0,04	0,07	0,50	4,82	7,45	5,32	5,82	9	91	0,60	1	6
B ₃	4,9	0,18	0,21	0,04	0,07	0,50	4,95	12,57	5,45	5,95	8	91	2,10	1	4

APÊNDICE M - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO PERFIL 07

PROJETO – Gateados

PERFIL N° – 07

DATA – 13/12/2016

CLASSIFICAÇÃO – Cambissolo Húmico Aluminoférreo latossólico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS – Município de Campo Belo do Sul, SC. Coordenadas UTM fuso 22S: 0517456–6909146.

SITUAÇÃO, DECLIVIDADE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Coletado em trincheira em região abaciada entre duas coxilhas com declividade 5%, sob floresta de Pinus.

ELEVAÇÃO – 900 metros.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Serral Geral

CRONOLOGIA – Período Cretáceo da Era Mesozoica

MATERIAL ORIGINÁRIO – Riodacito

PEDREGOSIDADE – Não Pedregoso.

ROCHOSIDADE – Ausente.

RELEVO LOCAL – Suave ondulado

RELEVO REGIONAL – Suave ondulado

EROSÃO – Ausente

DRENAGEM – Bem drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Mata Atlântica.

USO ATUAL – Floresta de Pinus.

DESCRITO E COLETADO POR – Ricardo Simão Diniz Dalmolin, Jean Bueno, Taciara Horst, Luciano Cancian e Estelita Penteado

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- A1** 0 – 22 cm; escuro (5 YR 2,5/1, úmido); francossiltosa; fraca a moderada, pequena e média grumosa; friável, não plástico e não pegajoso; transição clara e plana; raízes muitas.
- A2** 22 – 33 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 2,5/1, úmido); francossiltosa; moderada, média blocos angulares e subangulares; friável, não plástico e não pegajoso; transição clara e plana; raízes muitas.
- A3** – 44 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 2,5/2, úmido); francossiltosa; moderada, blocos angulares; friável, não plástico e não pegajoso; transição clara e plana; raízes poucas.
- A4** 44 – 60 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 2,5/2, úmido); franca; moderada, pequena a média blocos subangulares; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição clara e plana; raízes raras.
- BA** 60 – 74 cm; bruno-acinzentado (7,5 YR 3/2, úmido), argila; moderada, média blocos subangulares; firme, plástico e pegajoso; transição clara e plana; raízes raras.
- B1** 74 – 97 cm; vermelho-amarelado (7,5 YR 4/5, úmido), argila; moderada, média blocos subangulares; firme, plástico e pegajoso; raízes raras.
- B2** 97 – 150+ cm; vermelho-amarelado (7,5 YR 4/5, úmido), argila/ muita argila; moderada, média blocos subangulares; firme, plástico e pegajoso; raízes raras.

OBSERVAÇÕES: Matéria Orgânica bem decomposta nos horizontes orgânicos. Presença de mais de 5% de minerais primários (1 a 2 mm) nos horizontes B1 e B2.

APÊNDICE N - CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 07

Horizonte		Composição Granulométrica da Terra Fina (g/kg)			Argila dispersa em água (g/kg)	Grau de floculação (%)	Relação Silte/Argila	Ds (g/cm³)	Pt	Ma	Mi	Ksat (mm/h)
		Areia	Silte	Argila							cm³/cm³	
A ₁	0 - 22	97	256	647	39	94	0,40	0,82	0,64	0,07	0,57	85
A ₂	22 - 33	78	391	531	31	94	0,74	0,57	0,7	0,06	0,64	47
A ₃	33 - 44	79	344	576	64	89	0,60	0,59	0,71	0,04	0,67	22
A ₄	44 - 60	69	343	588	60	90	0,58	0,67	0,75	0,09	0,66	47
BA	60-74	83	318	599	191	68	0,53	0,91	0,62	0,06	0,56	85
B ₁	74 - 97	89	322	589	250	58	0,55	1	0,61	0,06	0,55	37
B ₂	97 - 150+	132	347	521	235	55	0,67	1,27	0,52	0,05	0,47	37

Hz.	pH H ₂ O	Complexo sortivo (cmol _c /kg ⁻¹)								V (%)	Al (%)	P (mg/kg)	MO (%)	C (g/kg)	
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al ³⁺	H+Al	CTC _{ef}						
A ₁	A ₁	4,8	0,68	0,35	0,12	0,07	1,22	6,08	22,59	7,30	23,81	5	83	5,70	10
A ₂	A ₂	4,8	0,53	0,40	0,06	0,07	1,06	4,69	22,42	5,75	23,48	5	82	2,10	10
A ₃	A ₃	4,9	0,54	0,30	0,05	0,09	0,98	4,43	14,82	5,41	15,80	6	82	1,00	6
A ₄	A ₄	4,9	0,41	0,30	0,05	0,09	0,85	4,36	16,34	5,21	17,19	5	84	0,80	6
BA	BA	4,9	0,45	0,30	0,05	0,07	0,87	4,36	10,77	5,23	11,64	7	83	0,20	3
B ₁	B ₁	4,9	0,50	0,30	0,05	0,09	0,94	4,76	9,20	5,70	10,14	9	84	2,10	2
B ₂	B ₂	4,8	0,40	0,30	0,06	0,07	0,83	4,95	7,05	5,78	7,88	11	86	0,80	1

APÊNDICE O - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO PERFIL 08

PROJETO – Gateados - Pistola

PERFIL N° – 08

DATA – 13/12/2016

CLASSIFICAÇÃO – Latossolo Vermelho-Amarelo Alumínico típico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS – Município de Campo Belo do Sul, SC. Coordenadas UTM fuso 22S: 0517433–6909140.

SITUAÇÃO, DECLIVIDADE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Coletado em trincheira em terço inferior de encosta com declividade de aproximadamente 5%, sob floresta de Pinus.

ELEVAÇÃO – 890 metros.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Serra Geral

CRONOLOGIA – Período Cretáceo da Era Mesozoica

MATERIAL ORIGINÁRIO – Riodacito

PEDREGOSIDADE – Não Pedregoso.

ROCHOSIDADE – Ausente.

RELEVO LOCAL – Suave Ondulado.

RELEVO REGIONAL – Suave Ondulado.

EROSÃO – Ausente

DRENAGEM – Bem drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Mata Atlântica.

USO ATUAL – Floresta de Pinus.

DESCRITO E COLETADO POR – Ricardo Simão Diniz Dalmolin, Jean Bueno, Taciara Horst, Luciano Cancian e Estelita Penteado.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- A** 0 – 20 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/2, úmido); francoargilosa; moderada, pequena e média blocos subangulares; firme, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição clara e gradual.
- AB** 20 – 39 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/3, úmido); francoargilosa; moderada, pequena e média blocos subangulares; firme, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição clara e gradual.
- BA** 39 – 60 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/3,5, úmido), argila; moderada pequena e média blocos subangulares; firme, plástico e pegajoso; transição clara e gradual.
- B1** 60 – 84 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/4, úmido), argila; moderada pequena e média blocos subangulares; firme, ligeiramente plástico e pegajoso; transição clara e gradual.
- B2** 84 – 120 cm; bruno-acinzentado (5 YR 4/3, úmido), muito argilosa; moderada pequena e média blocos subangulares; friável, plástico e pegajoso; transição clara e gradual.
- B3** 120 – 160+ cm; bruno-avermelhado (5 YR 4/4, úmido), muito argilosa; moderada pequena e média blocos subangulares; friável, plástico e pegajoso; transição clara e gradual.

APÊNDICE P - CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 08

Horizonte		Composição Granulométrica da Terra Fina (g/kg)			Argila dispersa em água (g/kg)	Grau de floculação (%)	Relação Silte/Argila	Ds (g/cm³)	Pt	Ma	Mi	Ksat (mm/h)
Símbolo	Profundidade	Areia	Silte	Argila					cm³/cm³			
A	0 - 20	105	323	572	158	72	0,6	0,85	0,68	0,22	0,46	636
AB	20 - 39	82	320	598	118	80	0,5	1,05	0,53	0,07	0,46	21
BA	39 - 60	55	204	741	191	74	0,3	1,01	0,59	0,14	0,45	103
B ₁	60 - 84	44	217	740	192	74	0,3	1,09	0,59	0,13	0,46	6
B ₂	84 - 120	66	305	630	86	86	0,5	1,18	0,56	0,09	0,46	2
B ₃	120 – 160+	74	234	691	1	100	0,3	1,14	0,57	0,09	0,48	75

Hz.	pH H ₂ O	Complexo sortivo (cmol _c /kg ⁻¹)								V (%)	Al (%)	P (mg/kg)	MO (%)	C (g/kg)	
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al ³⁺	H+Al	CTC _{ef}						
A	4,7	2,05	2,25	0,07	0,07	4,44	4,95	11,74	9,39	13,83	32	53	4,70	4	26
AB	4,7	0,47	0,67	0,03	0,07	1,24	5,41	10,36	6,65	7,89	16	81	1,20	3	20
BA	4,8	0,40	0,27	0,03	0,05	0,75	5,42	9,60	6,17	6,92	11	88	0,90	2	13
B ₁	4,9	0,31	0,21	0,03	0,07	0,62	5,15	8,81	5,77	6,39	10	89	1,20	2	9
B ₂	4,9	0,30	0,25	0,02	0,07	0,64	3,90	6,68	4,54	5,18	12	86	2,20	1	5
B ₃	4,5	0,3	0,29	0,06	0,1	0,75	3,3	5,7	4,05	4,8	16	81	3,2	1	3

APÊNDICE Q - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO PERFIL 09

PROJETO – Gateados - Pistola

PERFIL N° – 09

DATA – 13/12/2016

CLASSIFICAÇÃO – Cambissolo Háplico Alumínico típico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS – Município de Campo Belo do Sul, SC. Coordenadas UTM fuso 22S: 0518401–6909705.

SITUAÇÃO, DECLIVIDADE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Coletado em trincheira em terço inferior de encosta com declividade de 12% a 15%, sob floresta de Pinus.

ELEVAÇÃO – 957 metros.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Serra Geral

CRONOLOGIA – Período Cretáceo da Era Mesozoica

MATERIAL ORIGINÁRIO – Riodacito

PEDREGOSIDADE – Pedregoso.

ROCHOSIDADE – Ausente.

RELEVO LOCAL – Ondulado.

RELEVO REGIONAL – Ondulado.

EROSÃO – Ausente

DRENAGEM – Bem drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta Nativa.

USO ATUAL – Floresta de Pinus.

DESCRITO E COLETADO POR – Ricardo Simão Diniz Dalmolin, Jean Bueno, Taciara Horst, Luciano Cancian e Estelita Penteado.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- A₁** 0 – 17 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 2,5/2, úmido); franco-argilosa; fraca, pequena grumosa; firme, ligeiramente plástico e pegajoso; transição gradual e plana; raízes muitas.
- A₂** 17 – 38 cm; bruno-escuro (7,5 YR 3/2, úmido); franco-argilosa; moderada, pequena e média granular; firme, plástico e pegajoso; transição clara e ondulada; raízes muitas.
- B₁** 38 – 60 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/3, úmido), argila; moderada pequena e média blocos sub-angulares; firme, ligeiramente plástico e pegajoso; raízes poucas.
- B₂** 60 – 90+ cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/4, úmido), argila; moderada, pequena e média blocos sub-angulares; firme, ligeiramente plástico e pegajoso; raízes poucas.

OBSERVAÇÕES: Presença de mais de 5% de minerais primários (1 a 2 mm) nos horizontes B1 e B2.

APÊNDICE R - CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 09

Horizonte		Composição Granulométrica da Terra Fina (g/kg)			Argila dispersa em água (g/kg)	Grau de floculação (%)	Relação Silte/Argila	Ds (g/cm ³)	Pt	Ma	Mi	Ksat (mm/h)
Símbolo	Profundidade	Areia	Silte	Argila					cm ³ /cm ³			
A ₁	0 - 17	114	328	558	159	71	0,6	0,67	0,72	0,33	0,39	658
A ₂	17 - 38	110	236	654	134	79	0,4	0,88	0,64	0,23	0,42	425
B ₁	38 - 60	77	285	638	266	58	0,4	1,03	0,59	0,12	0,47	134
B ₂	60 - 90+	77	230	693	237	66	0,3	1,00	0,60	0,19	0,41	652

Hz.	pH H ₂ O	Complexo sortivo (cmol _c /kg ⁻¹)								V (%)	Al (%)	P (mg/kg)	MO (%)	C (g/kg)	
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al ³⁺	H+Al	CTC _{ef}						
A ₁	4,5	0,44	0,29	0,06	0,10	0,89	7,13	13,10	8,02	13,99	6	89	3,20	4	20
A ₂	4,5	0,17	0,12	0,03	0,12	0,44	5,81	14,84	6,25	15,28	3	93	1,50	3	18
B ₁	4,6	0,15	0,05	0,02	0,12	0,34	5,88	11,54	6,22	11,88	3	95	1,10	3	15
B ₂	4,7	0,16	0,03	0,02	0,09	0,30	5,28	9,40	5,58	9,70	3	95	0,10	2	9

APÊNDICE S - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO PERFIL 10

PROJETO – Gateados - Pistola

PERFIL N° – 10

DATA – 13/12/2016

CLASSIFICAÇÃO – Latossolo Vermelho-Amarelo Alumínico típico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS – Município de Campo Belo do Sul, SC. Coordenadas UTM fuso 22S: 0518401–6909705.

SITUAÇÃO, DECLIVIDADE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Coletado em trincheira em terço médio de encosta com declividade de 8%, sob floresta de Pinus.

ELEVAÇÃO – 885 metros.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Serra Geral

CRONOLOGIA – Período Cretáceo da Era Mesozoica

MATERIAL ORIGINÁRIO – Riodacito

PEDREGOSIDADE – Não Pedregoso.

ROCHOSIDADE – Ausente.

RELEVO LOCAL – Suave ondulado.

RELEVO REGIONAL – Suave ondulado.

EROSÃO – Ausente

DRENAGEM – Bem drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Mata Atlântica.

USO ATUAL – Floresta de Pinus.

DESCRITO E COLETADO POR – Ricardo Simão Diniz Dalmolin, Jean Bueno, Taciara Horst, Luciano Cancian e Estelita Penteado.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- A1** 0 – 20 cm; bruno-avermelhado-escuro (10YR 3/2, úmido); francoargilosa; forte, média e grande blocos angulares e subangulares; firme, plástico e pegajoso; transição clara e plana.
- A2** 20 – 37 cm; bruno-escuro (7,5 YR 3/2, úmido); francoargilosa; moderada a forte, média e grande blocos angulares e subangulares; firme, plástico e ligeiramente pegajoso; transição clara e gradual.
- BA** 37 – 58 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/4, úmido); argila; moderada pequena e média blocos subangulares; firme, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição clara e plana; raízes poucas.
- B1** 58 – 100 cm; bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/4, úmido); argila; moderada a forte, pequena, média e grande blocos angulares e subangulares; firme, plástico e pegajoso; transição clara e plana.
- B2** 100 – 150+ cm; vermelho-amarelado (5 YR 3/6, úmido); argila; forte, média e grande blocos angulares e subangulares; firme, ligeiramente plástico e pegajoso; transição clara e plana.

APÊNDICE T - CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – Perfil 10

Horizonte		Composição Granulométrica da Terra Fina (g/kg)			Argila dispersa em água (g/kg)	Grau de floculação (%)	Relação Silte/Argila	Ds (g/cm³)	Pt	Ma	Mi	Ksat (mm/h)
Símbolo	Profundidade	Areia	Silte	Argila					cm³/cm³	cm³/cm³	cm³/cm³	
A ₁	0 - 20	78	322	600	117	81	0,5	0,77	0,71	0,2	0,51	486
A ₂	20 - 37	72	237	691	196	72	0,3	1	0,62	0,14	0,49	137
BA	37 - 58	69	227	704	196	72	0,3	0,97	0,61	0,17	0,44	207
B ₁	58 - 100	57	239	704	193	73	0,3	0,98	0,59	0,14	0,45	60
B ₂	100 - 150+	60	302	638	97	85	0,5	1,05	0,59	0,15	0,43	486

Hz.	pH H ₂ O	Complexo sortivo (cmol _c /kg ⁻¹)								V (%)	Al (%)	P (mg/kg)	MO (%)	C (g/kg)	
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al ³⁺	H+Al	CTC _{ef}	CTC _{ph7}					
A ₁	4,5	0,77	2,13	0,09	0,09	3,08	8,78	15,81	11,86	18,89	16	74	3,00	5	30
A ₂	4,6	0,29	0,87	0,05	0,07	1,28	5,68	12,13	6,95	13,40	10	82	2,70	4	22
BA	4,7	0,32	0,56	0,04	0,07	0,99	2,78	10,57	3,77	11,56	9	74	1,70	2	11
B ₁	4,6	0,35	0,30	0,04	0,05	0,74	5,41	8,81	6,15	9,55	8	88	0,70	1	8
B ₂	4,8	0,84	0,15	0,03	0,07	1,09	4,62	5,90	5,71	6,99	16	81	0,10	1	3

APÊNDICE U - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO PERFIL 11

PROJETO – Gateados - Pistola

PERFIL N° – 11

DATA – 13/12/2016

CLASSIFICAÇÃO – Gleissolo Melânico Alumínico típico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS – Município de Campo Belo do Sul, SC. Coordenadas UTM fuso 22S: 0517891–6909488.

SITUAÇÃO, DECLIVIDADE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Coletado em trincheira no sopé, em área abaciada, com declividade menor que 3%, em área de preservação permanente (APP).

ELEVAÇÃO – 860 metros.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Serra Geral

CRONOLOGIA – Período Cretáceo da Era Mesozoica

MATERIAL ORIGINÁRIO – Riodacito

PEDREGOSIDADE – Não Pedregoso.

ROCHOSIDADE – Ausente.

RELEVO LOCAL – Plano

RELEVO REGIONAL – Plano

EROSÃO – Ausente

DRENAGEM – Imperfeitamente a mal drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Área de preservação permanente.

USO ATUAL – Área de preservação permanente.

DESCRITO E COLETADO POR – Jean Michel Moura Bueno e Taciara Horst.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A1 0 – 20 cm; bruno-escuro (10YR 2,5/1, úmido); franca; moderada, pequena média e grande blocos subangulares; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição clara e plana; raízes abundantes.

A2 20 – 32 cm; bruno-escuro (10YR 2,5/1, úmido); francoargilosa; moderada, pequena e média blocos subangulares; friável, plástico e pegajoso; transição clara e ondulada; raízes abundantes.

Cg1 32 – 60 cm; bruno (10 YR 4/3, úmido); argilossiltosa; forte, pequena, média e grande blocos angulares e subangulares; friável, plástico e pegajoso; transição clara e plana; raízes raras.

Cg2 60+ cm; transição clara e plana; raízes raras.

APÊNDICE V - CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA – PERFIL 11

Horizonte		Composição Granulométrica da Terra Fina (g/kg)			Argila dispersa em água (g/kg)	Grau de floculação (%)	Relação Silte/Argila	Ds (g/cm ³)	Pt	Ma	Mi	Ksat (mm/h)
Símbolo	Profundidade	Areia	Silte	Argila					cm ³ /cm ³	-	-	
A ₁	0 - 20	54	382	564	61	89	0,7	-	-	-	-	-
A ₂	20 -32	47	279	675	209	69	0,4	-	-	-	-	-
Cg ₁	32 - 60	49	247	705	370	47	0,4	-	-	-	-	-
Cg ₂	60 +	42	288	670	291	57	0,4	-	-	-	-	-

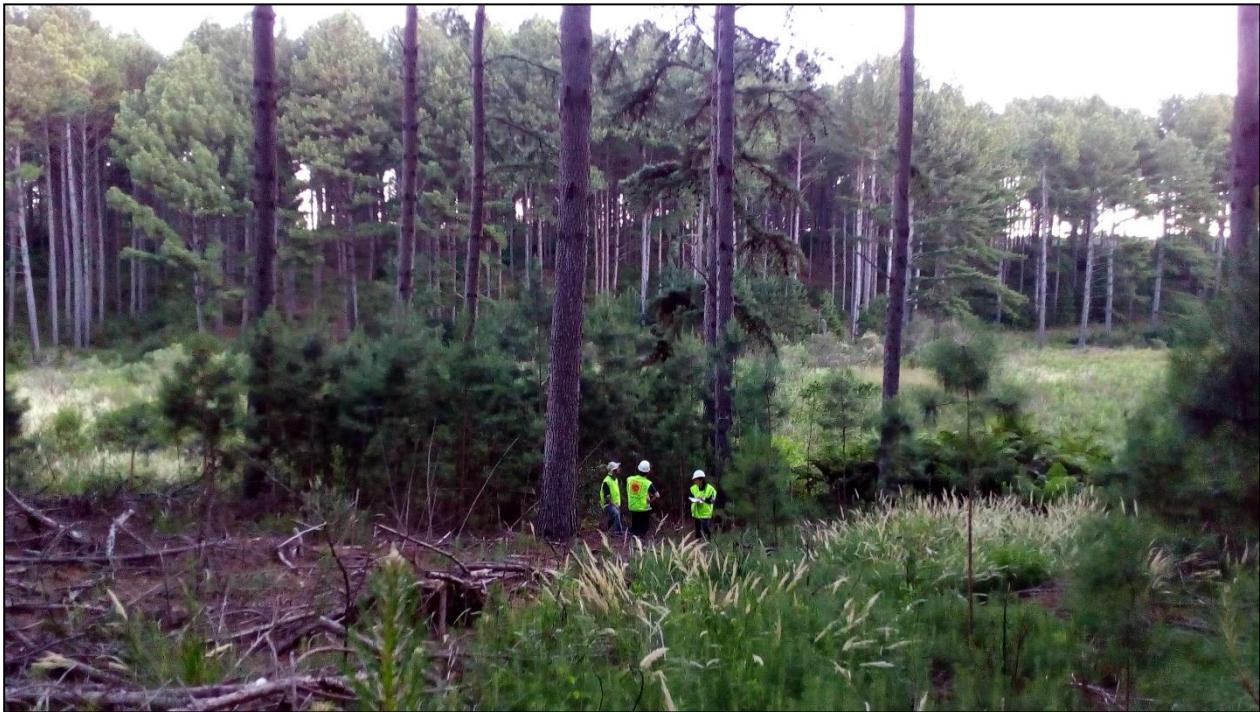
Hz.	pH H ₂ O	Complexo sortivo (cmol _c /kg ⁻¹)									V (%)	Al (%)	P (mg/kg)	MO (%)	C (g/kg)
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al ³⁺	H+Al	CTC _{ef}	CTC _{ph7}					
A ₁	4,3	1,22	0,33	0,08	0,09	1,72	7,25	19,12	8,97	20,84	8	81	3,40	7	43
A ₂	4,5	1,39	0,27	0,05	0,07	1,78	7,91	17,36	9,69	19,14	9	82	2,00	5	28
Cg ₁	4,9	0,48	0,11	0,06	0,07	0,72	6,60	10,56	7,32	11,28	6	90	1,50	1	7
Cg ₂	4,6	0,70	0,09	0,01	0,05	0,85	7,52	9,00	8,37	9,85	9	90	0,90	1	6

APÊNDICE W – DESCRIÇÃO DE PERFIS E COLETA DE DADOS PEDOLÓGICOS DA AMOSTRAGEM 1 E 2 (A) E (B)

(A)



(B)



APÊNDICE X –COLETA DE DADOS DENDROMÉTRICOS: CAP (A) E ALTURA (B E C)

(A)



(B)



(C)



APÊNDICE Y – DISTRIBUIÇÃO DE RAÍZES DE *Pinus taeda* EM SOLOS RASOS

**APÊNDICE Z – EVIDÊNCIAS DE ALTERAÇÃO MORFOLÓGICA RADICULAR EM
Pinus taeda CAUSADAS POR RESTRIÇÕES DO PROFUNDIDADE DO SOLUM**

