

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do solo e da Água



Tese

**Atributos Físicos Associados à Matéria Orgânica do Solo e à Distribuição
Radicular em uma transecção na Sub-Bacia Micaela, RS**

Rodrigo Brum de Paiva

Pelotas, 2020

RODRIGO BRUM DE PAIVA

**Atributos Físicos Associados à Matéria Orgânica do Solo e à Distribuição
Radicular em uma transecção na Sub-Bacia Micaela, RS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção de título de Doutor em Ciências.

Orientadora: Prof^a. Dr.^a Cláudia Liane Rodrigues de Lima

Co-Orientadora: Prof^a. Dr.^a Maria Cândida Moitinho Nunes

Pelotas, Dezembro de 2020

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

P142a Paiva, Rodrigo Brum de

Atributos Físicos Associados à Matéria Orgânica do Solo e à Distribuição Radicular em uma transecção na Sub-Bacia Micaela, RS / Rodrigo Brum de Paiva ; Cláudia Liane Rodrigues de Lima, orientadora ; Maria Cândida Moitinho Nunes, coorientadora. — Pelotas, 2019.

130 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2019.

1. Geoestatística. 2. Semivariogramas. 3. Dependência espacial. 4. Mata nativa. 5. Pastagem . I. Lima, Cláudia Liane Rodrigues de, orient. II. Nunes, Maria Cândida Moitinho, coorient. III. Título.

CDD : 632.4

Resumo

PAIVA, Rodrigo Brum. **Atributos Físicos Associados à Matéria Orgânica do Solo e a Distribuição Radicular em uma Transecção na Sub-Bacia Micaela, RS** 2020. 130f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - Brasil.

As alterações na estrutura dos solos, por ações antrópicas, têm modificado o crescimento radicular e a produtividade agrícola. Compreender a variabilidade e os impactos que comprometem a qualidade do solo, em escala de bacias hidrográficas, é fundamental para o adequado planejamento em macro escala. No sentido de entender o comportamento dos atributos do solo, diante da variabilidade natural que as bacias hidrográficas apresentam foram realizadas amostragens de solos com estrutura deformada e indeformada ao longo de uma transecção na sub-bacia Micaela, pertencente ao município de Pelotas, RS. Foram determinados nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, os atributos: densidade (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), areia, silte, argila, resistência à penetração (RP) e carbono orgânico total (COT). O sistema radicular foi avaliado pelo método do perfil conjuntamente com análise digital de imagens 2D, sendo as raízes classificadas de acordo com o seu diâmetro (≤ 1 e $2 > 2$ mm). Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva (medidas de posição e assimetria), testes de normalidade e dispersão dos dados. Para verificar a dependência espacial foram confeccionados semivariogramas e para avaliação do sistema radicular foram elaborados mapas de superfície das variáveis analisadas por meio da krigagem ou inverso do quadrado da distância (IDW). Foi constatado que 47,47% das observações referentes ao atributo RP encontram-se acima do valor crítico (2 MPa) para o desenvolvimento radicular. As variáveis Ds, PT, RP, Ug, COT, areia, argila e diâmetro médio radicular (DM), apresentaram estrutura de dependência espacial, sendo de grau moderado e o semivariogramas ajustados pelo modelo esférico. O alcance desses atributos foi superior ao estabelecido no plano de amostragem, tornando-se base para futuros estudos neste local. A maior concentração de raízes predominou na camada de solo 0,00-0,10 m. A classe de maior ocorrência foi de raízes finas, ou seja, com diâmetro inferior a 1 mm. Os mapas temáticos gerados pela krigagem e IDW representaram de maneira satisfatória a distribuição espacial dos atributos radiculares, subsidiando a análise qualitativa das interações com os atributos físicos em diferentes usos com contrastes marcantes entre mata nativa e pastagem.

Palavras-chave: geoestatística, semivariogramas, dependência espacial, análise de imagem digital de raízes, pastagem, mata nativa.

Abstract

PAIVA, Rodrigo Brum. **Physical Attributes Associated with Soil Organic Matter and Radicular Distribution in the Transition Micaela Sub-Basin**. 2020. 130f. Thesis (doctorate degree) – Post-Graduation Program of Conservation and Management of Soil and Water. Federal University of Pelotas, Pelotas - Brazil.

Changes in soil structure by anthropic actions have modified root growth and agricultural productivity. Understanding the variability and impacts that compromise soil quality at river basin scale is critical to proper macro scale planning. In order to understand the behavior of soil attributes, in view of the natural variability of the watersheds, samples of deformed and undisturbed soils were sampled along a transection in the Micaela sub-basin, in the municipality of Pelotas, RS. In the layers of 0.00-0.10 and 0.10-0.20 m, the following attributes were determined: bulk density (Db), total porosity (PT), macroporosity (Ma), microporosity (Mi), sand, silt, clay, penetration resistance (RP) and total organic carbon (TOC). The root system was evaluated by the profile method together with digital analysis of 2D images, and the roots were classified according to their diameter (≤ 1 and > 2 mm). Data were submitted to descriptive statistical analysis (position and asymmetry measurements), normality tests and data dispersion. To verify the spatial dependence, semivariograms were made and to evaluate the root system, surface maps of the analyzed variables were prepared by means of kriging or inverse square of the distance (IDW). It was found that 47.47% of the observations regarding the RP attribute are above the critical value (2 MPa) for root development. The variables Db, PT, RP, Ug, TOC, sand, clay and root mean diameter (DM) presented spatial dependence structure, being of moderate degree and semivariograms adjusted by the spherical model. The range of these attributes was higher than established in the sampling plan, making it the basis for future studies in this location. The highest root concentration predominated in the soil layer 0.00-0.10 m. The most common class was thin roots, that is, with a diameter of less than 1 mm. The thematic maps generated by kriging and IDW satisfactorily represented the spatial distribution of root attributes, supporting the qualitative analysis of interactions with physical attributes in different uses with marked contrasts between native forest and pasture.

Keywords: geostatistics, semivariograms, spatial dependence, digital root analysis, pasture, native forest.

Dedico:

Aos meus pais Nicanor e Anelice

Aos meus irmãos Jeison e Maurício

À minha companheira Mariana

A minha filha Liz

Agradecimentos

À Universidade Federal de Pelotas, ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, pela oportunidade de realização do curso.

À Orientadora, Professora Dra. Cláudia Liane Rodrigues de Lima, pela orientação e transmissão de seus conhecimentos durante o mestrado e doutorado, tornando-se mais que uma orientadora, uma amiga, minha admiração e respeito. Agradeço também por estimular minha participação em experiências profissionais que vão muito além dos protocolos de pesquisas, estas possuem valores imensuráveis.

À Co-orientadora, Professora Maria Cândida Moitinho Nunes pela orientação, pela contribuição no meu processo de formação, pela ajuda, pela amizade, enfim por tudo, o meu muito obrigado.

Ao meu irmão Jeison, que participou das coletas e auxiliou nas análises de solo, além de me apoiar incondicionalmente nesta caminhada, meu irmão te amo, muito obrigado por sempre estar comigo.

À minha filha Liz, que nasceu no decorrer desta jornada e me fez perceber o quanto as pessoas próximas são muito importantes, despertando em mim a gratidão e o amor a todos, muito obrigado filha, estarei sempre contigo.

Ao pessoal do laboratório de física do solo e amigos que ajudaram na realização deste projeto com empenho, pela ajuda nas análises laboratoriais das amostras, pois sem o apoio deles tudo seria mais difícil, em especial Paulo, Rose e Dona Ana.

Aos colegas de pós-graduação, que nunca mediram esforços para cooperar, em especial, Alexssandra, Thaís Silva, Gabriel Lemos, Mussa, Marlon, Miguel, Maurício, Stefan, Sibele e Ivana pela ajuda imensurável para realização desta pesquisa.

Aos meus amigos e parceiros da empresa Bio Sustent Soluções Ambientais Leandro Gomes, Leandro Tunes e Wildon Panziera pelo incentivo e paciência nessa empreitada.

Aos professores Álvaro Nebel e Marcelo Hartwig as pesquisadoras Lizete Stumpf e Marília Alves pelas excelentes contribuições na etapa qualificação, bem como, de defesa desta Tese.

Por fim não menos importante, a minha família, Nicanor, Anelice, Jeison, Maurício e minha companheira, Mariana, pelo incentivo e apoio em todas as etapas da construção deste trabalho. Agradeço, a todos que, de uma forma ou de outra, me ajudaram. A vocês o meu sincero muito obrigado.

Lista de Figuras

Figura 1 – Localização da sub-bacia hidrográfica Micaela, situada na Bacia Mirim – São Gonçalo, Pelotas, RS. Elaborado por: Stefan Domingues Nachtigall.	34
Figura 2 – Mapa hidrografia da sub-bacia Micaela, Pelotas-RS. Elaborado por: Stefan Domingues Nachtigall. Fonte: FEPAM (2005).	35
Figura 3 – Mapa de altimetria da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS. Elaborado por: Stefan Domingues Nachtigall.	36
Figura 4 – Mapa de Classificação de Solos quanto a resistência a impactos ambientais, RS. Elaborado por: Nestor Kämpf. Fonte: FEPAM (2001).	37
Figura 5 – Principais classes de solo da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS. Elaborado por: Stefan Domingues Nachtigall. RLd1 - associações de Neossolo Litólico distrófico e Argissolo Amarelo Distrófico; SXe2 - associações de Planossolo Háplico Eutrófico e Argissolo Acinzentado Eutrófico; PVad7 - associações de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico; e Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico; PAd4 - associações de Argissolo Amarelo Distrófico e Neossolo Litólico Distrófico.	38
Figura 6 – Porcentagem de área ocupada por tipos de usos do solo ao longo da transecção na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	39
Figura 7 – Transecto georreferenciado com espaçamento (E) entre pontos de 112 metros para a realização das coletas de solo ao longo da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS. Elaborado por: Gabriel da Silva Lemos.	40
Figura 8 – Localização de trincheiras para aquisição das imagens do sistema radicular e coletas de solo ao longo da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS. Elaborado por: Gabriel da Silva Lemos.	40
Figura 9 – Procedimento adotado para coleta de amostras indeformadas ao longo da transecção sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS. (a) remoção da vegetação da área superficial para o solo ser amostrado; (b) posicionamento dos anéis no solo para proceder a coleta; (c) inserção dos anéis no solo; (d) processo de remoção do anel e solo; (e) retirada de amostra de solo.	42
Figura 10 – Atuador eletrônico linear e a avaliação da resistência mecânica a penetração do solo. (a) vista geral do equipamento; (b) vista aproximada da inserção da haste na amostra. Fonte: Autor.	43
Figura 11 – Procedimento adotado para coleta de amostras deformadas ao longo da transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS: (a) remoção da	

vegetação da área superficial para o solo ser amostrado; (b) inserção da pá no solo para extrair a amostra; (c) amostra de solo removida e (d) amostras de solo embaladas e identificadas. Fonte: Autor	43
Figura 12 – Análise de carbono orgânico (a) vista das amostras preparadas para o procedimento de titulação; (b) aparatos utilizados na titulação.	44
Figura 13 – Amostragem do sistema radicular ao longo do transecto na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS. (a) abertura da trincheira; (b) lavagem do perfil com a finalidade de expor as raízes; (c) posicionamento do malha (gride); (d) Fotografia; (e) secção a ser avaliada. Fonte: Autor.....	45
Figura 14 – Análise da resistência a penetração estimada pelo modelo Busscher (1990) e observada na transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	53
Figura 15 – Regressão linear entre os valores de resistência a penetração estimados pelo modelo Busscher (1990) e os observados na transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	53
Figura 16 – Classificação textural de solos (pontos georreferenciados) ao longo da transecção sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS. Elaborado por Thaís Palumbo Silva.	55
Figura 17 – Gráfico do tipo boxplot e histograma de densidade para os atributos (a) densidade do solo; (b) porosidade total e (c) macroporosidade respectivamente, na transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	57
Figura 18 – Gráfico do tipo boxplot e histograma de densidade para os atributos (a) microporosidade; (b) resistência à penetração e (c) umidade respectivamente, na transecção sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	58
Figura 19 – Gráfico do tipo boxplot e histograma de densidade para os atributos (a) areia; (b) silte e (c) argila respectivamente na transecção sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	59
Figura 20 – Gráfico do tipo boxplot e histograma de densidade para o atributo o carbono orgânico total respectivamente na transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	60
Figura 21 – Distribuição espacial da densidade (a), da porosidade total (b), microporosidade (c), resistência à penetração (d) e umidade dos solos (f), e suas respectivas médias (linha pontilhada) na transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	62

Figura 22 – Distribuição espacial da areia (a), do silte (b), da argila (c), do carbono orgânico total dos solos (d) e suas respectivas médias (linha pontilhada) na transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	63
Figura 23 – Semivariogramas da densidade do solo (a) e porosidade total (b) da transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	65
Figura 24 – Semivariogramas da macroporosidade (a) e microporosidade (b) da transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	65
Figura 25 – Semivariogramas da resistência à penetração (a) e Ug (b) da transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	66
Figura 26 – Semivariogramas da areia (a) e silte (b) da transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	66
Figura 27 – Semivariogramas da argila (a) e COT (b) da transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	67
Figura 28 – Perfil de raízes, uso mata nativa, associações de solo PVad 7, ênfase camada de solo de 0,10 a 0,20 m, sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	73
Figura 29 – Perfil de raízes, uso pastagem, associações de solo PVad 7, ênfase camada de solo de 0,10 a 0,20 m, sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	73
Figura 30 – Distribuição percentual do volume das raízes em relação classificação de diâmetros nas respectivas associações de solo, usos e camadas avaliadas na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	75
Figura 31 – Distribuição percentual da área superficial das raízes em relação classificação de diâmetros nas respectivas associações de solo usos e camadas avaliadas na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	76
Figura 32 – Distribuição percentual do comprimento das raízes em relação classificação de diâmetros nas respectivas associações de solo, usos e camadas avaliadas na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	77
Figura 33 – Semivariogramas do diâmetro médio radicular, usos (a) vegetação espontânea (VE2) e (b) mata nativa (MN1), associação de solo SXe2 da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	85
Figura 34 – Semivariogramas do diâmetro médio radicular, uso (a) mata nativa MN2, associação de solo SXe2 e uso (b) mata nativa (MN2), associação de solo PVad7 da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	85

Figura 35 – Mapa da distribuição espacial do diâmetro médio radicular, usos (a) vegetação espontânea (VE2) e (b) mata nativa (MN1), associação de solo SXe2 da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	88
Figura 36 – Mapa da distribuição espacial do diâmetro médio radicular, uso (a) mata nativa MN2, associação de solo SXe2 e uso (b) mata nativa (MN2), associação de solo PVad7 da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	88
Figura 37 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso pastagem (PA1), na associação de solo SXe2, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	90
Figura 38 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso pastagem (PA2), na associação de solo SXe2, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	91
Figura 39 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso vegetação espontânea (VE1), na associação de solo SXe2, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	91
Figura 40 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso vegetação espontânea (VE2), na associação de solo SXe2, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	92
Figura 41 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso mata nativa (MN1), na associação de solo SXe2, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	92
Figura 42 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso mata nativa (MN2), na associação de solo SXe2, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	93
Figura 43 - Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso pastagem (PA1), na associação de solo PVad7, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	93
Figura 44 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso pastagem (PA2), na associação de solo PVad7, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	94
Figura 45 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso vegetação espontânea	

(VE1), na associação de solo PVad7, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	94
Figura 46 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso vegetação espontânea (VE2), na associação de solo PVad7, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	95
Figura 47 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso mata nativa (MN1), na associação de solo PVad7, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	95
Figura 48 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso mata nativa (MN2), na associação de solo PVad7, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	96
Figura 49 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso pastagem (PA1), na associação de solo RLd1, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	96
Figura 50 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso pastagem (PA2), na associação de solo RLd1, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	97
Figura 51 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso vegetação espontânea (VE1), na associação de solo RLd1, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	97
Figura 52 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso vegetação espontânea (VE2), na associação de solo RLd1, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	98
Figura 53 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso mata nativa (MN1), na associação de solo RLd1, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	98
Figura 54 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso mata nativa (MN2), na associação de solo RLd1, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	99

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Estatística descritiva (medidas de posição, de dispersão e de forma) das variáveis avaliadas na camada 0,00 a 0,10 m, ao longo da transecção espacial na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	50
Tabela 2 - Teste não paramétrico de Kolmogorov – Smirnov, ao nível de 5% das variáveis, na camada de 0,00 a 0,10 m, ao longo da transecção espacial na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	60
Tabela 3 - Modelo teórico do semivariograma para atributos do solo avaliados, na camada de 0,00 a 0,10 m, ao longo da transecção espacial da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	69
Tabela 4 - Frações granulométricas e textura das associações de solos (SXe2, PVad7 e RLd1) nas camadas de 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m sob diferentes usos na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	69
Tabela 5 - Estatística descritiva, medida de posição das variáveis físicas do solo, carbono orgânico total e das frações granulométricas do carbono orgânico, nas camadas de 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m, avaliadas nas diferentes classes de solo e usos na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	70
Tabela 6 - Estatística descritiva, medida de posição das variáveis avaliadas, nas camadas de 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m, nas diferentes classes de solos e usos na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.....	72
Tabela 7 – Matriz de Correlação de Spearman atributos radiculares, atributos físicos, carbono orgânico total e suas frações granulométricas.	79
Tabela 8 - Estatística descritiva com medidas de posição, de dispersão, de forma, teste de normalidade dos atributos radiculares na associação de solo SXe2.	81
Tabela 9 - Estatística descritiva com medidas de posição, de dispersão, de forma, teste de normalidade dos atributos radiculares na associação de solo PVad7.	82
Tabela 10 - Estatística descritiva com medidas de posição, de dispersão, de forma, teste de normalidade dos atributos radiculares na associação de solo RLd1.	83
Tabela 11 - Modelo teórico do semivariogramas para o atributo diâmetro médio radicular (DM), na associação de solo SXe2, sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.	87

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	20
2.	HIPÓTESES.....	22
3.	OBJETIVOS	22
3.1.	Objetivo geral.....	22
3.2.	Objetivos Específicos.....	23
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
4.1.	Indicadores de qualidade do solo	23
4.2.	Variabilidade espacial de atributos de solo e de planta	29
4.3.	Estudos de atributos de solo e de planta em escala de bacias hidrográficas	31
5.	MATERIAL E MÉTODOS.....	33
5.1.	Localização	33
5.2.	Avaliação de atributos.....	39
5.2.1	Avaliações de atributos físicos do solo	41
5.2.2	Avaliações do carbono orgânico total e frações granulométricas	44
5.2.3	Avaliação do sistema radicular	45
5.3.	Análise dos dados.....	46
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
6.1	Distribuição espacial de atributos do solo	50
6.1.1	Análise exploratória dos dados	50
6.1.2	Análise de dependência espacial.....	63
6.2	Distribuição espacial de atributos radiculares	69
6.2.1	Análise exploratória dos dados	69
6.2.2	Análise de correlação Spearman entre os atributos radiculares e as variáveis físicas, COT e frações granulométricas	78
6.2.3	Análise de dependência espacial das variáveis radiculares	80
6.2.4	Interpolação dos atributos radiculares	87
	CONCLUSÕES	101
7.	REFERÊNCIAS.....	102

1. INTRODUÇÃO

A degradação do solo tem constituído um problema a nível mundial, com consequências ambientais, sociais e económicas. Embora exerça fundamental importância na vida dos seres humanos e na sustentação da vida do planeta, o solo ainda tem sido pouco valorizado como um recurso natural. A falta de um planeamento adequado e a carência de informações referentes ao uso e a ocupação de solos, inferem em consequências negativas aos ecossistemas (DEMARCHI; ZIMBACK, 2014).

Pesquisadores descrevem que este planeamento seja um processo contínuo que envolva coleta, organização e análise das informações, por meio de procedimentos e métodos, para se chegar a decisões ou alternativas para o aproveitamento em função de potencialidades do solo (BRAGA, 2005; FLAUZINO et al., 2016).

As bacias hidrográficas são unidades territoriais representativas para o meio ambiente, proporcionando a compreensão de um sistema ambiental relacionado a estruturação das redes de elementos fluviais, que é resultante da interação de elementos geológicos, climatológicos, topográficos, biogeográficos e pedológicos (FROTA, 2012).

Entender o comportamento espacial das propriedades físicas do solo em bacias hidrográficas torna-se necessário para a adoção e manutenção de um sistema de gestão sustentável. Segundo Cherubin et al. (2015), monitorar as alterações ocorridas nos atributos, condicionadas pelos sistemas e práticas de manejo de solo, é essencial para definir e traçar estratégias com reduzido impacto ao ambiente.

A qualidade física do solo assume importância na avaliação do grau de degradação e na identificação de adequados e sustentáveis sistemas de uso e manejo. A fragilidade ambiental é geralmente mensurada por meio do monitoramento dos seus atributos (DIAS, 2002; VEZZANI; MIELNICZUK, 2009). Indicadores como a densidade, porosidade (SILVA et al., 2000; TORMENA et al., 2004; CARNEIRO et al., 2009) e resistência mecânica à penetração (TAVARES FILHO; RIBON, 2008), são utilizados como parâmetros de qualidade estrutural do solo.

Atributos químicos como o teor de carbono orgânico total do solo, associados a suas frações granulométricas como o carbono orgânico particulado (COP) e o carbono orgânico associado a minerais do solo (COAM), tem sido frequentemente utilizados como indicadores de sustentabilidade e da produtividade dos ecossistemas agrícolas (VIANNA et al., 2012), sendo considerado mais responsivo à degradação da qualidade ambiental (CHERUBIN et al., 2015). Compreender a dinâmica desses compartimentos do carbono orgânico do solo e suas correlações pode servir como indicadores de mudanças ambientais, resultando na melhor compreensão da interação entre usos e coberturas nos ecossistemas (LIMA et al., 2016; FONTANA et al., 2017).

As avaliações dos sistemas radiculares complementam a análise da qualidade física, subsidiando a tomada de decisões em relação ao uso e manejo do solo (IVO MELLO et al., 1999; SIX et al., 2004; SALTON; TOMAZI, 2014). Essas avaliações em diferentes plantas e/ou solos tem demonstrado importância na identificação de padrões de crescimento (FREDDI et al., 2009).

Parâmetros como área superficial, diâmetro médio e comprimento radicular têm sido utilizados na avaliação da eficiência na absorção de água e de nutrientes das plantas (JORGE; RODRIGUES 2008) e nos efeitos da compactação do solo (FREDDI et al., 2009; VALADÃO et al., 2015). O comprimento radicular representa o parâmetro de maior importância para os estudos da arquitetura e da dinâmica radicular (DOWDY et al., 1995; ROSSIELLO et al., 1995; JORGE; SILVA 2010).

Ferramentas que possibilitam analisar e compreender a distribuição espacial dos atributos do solo são essenciais para a gestão dos recursos naturais (solo-raiz) (ROSA FILHO et al., 2011; CAMPOS et al., 2013; CARDUCCI et al., 2013), possibilitando monitorar o comportamento dos seus atributos, especialmente em ambientes naturais (GOMES et al., 2007). Podem também, se tornar mecanismos para a proposição de práticas de gestão das atividades agrícolas e, principalmente servir de instrumento para subsidiar a tomada de decisões (CHIG et al., 2008; CAMPOS et al., 2010). Estudos têm demonstrado que a variabilidade espacial de atributos do solo não ocorre ao acaso, mas apresentam correlação ou dependência espacial (CAMBARDELLA et al., 1994; SOUZA et al., 2006; MONTANARI et al., 2012).

Visando subsidiar estudos de uso e parametrizações de indicadores de qualidade do solo, o objetivo deste foi analisar a variabilidade espacial da qualidade

estrutural a partir de atributos físicos do solo, dos teores de carbono orgânico e da distribuição das raízes de culturas ao longo de um transecto, em uma sub-bacia hidrográfica (Micaela), inserida na bacia hidrográfica do Mirim – São Gonçalo, em Pelotas, RS.

2. HIPÓTESES

- i) A distribuição espacial de atributos físicos, o teor de carbono orgânico e parâmetros radiculares auxiliam na avaliação e no monitoramento da qualidade do solo.
- ii) A geoestatística identifica e quantifica os diferentes padrões de variabilidade espacial dos atributos físicos e do carbono orgânico do solo e comportamento radicular.
- iii) O volume, área superficial, o comprimento e o diâmetro médio radicular das culturas correlacionam-se direta e indiretamente com atributos físicos e com o carbono orgânico do solo.
- iv) Mapas de distribuição espacial dos atributos radiculares auxiliam no conhecimento da suscetibilidade à degradação de solos sob diferenciados usos na sub-bacia Micaela.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

Visando o fornecimento de subsídios para o planejamento conservacionista agrícola e ambiental em diferentes usos e manejos, o objetivo geral foi avaliar a variabilidade espacial da qualidade física estrutural a partir dos parâmetros densidade, porosidade, resistência mecânica à penetração, carbono orgânico total, carbono orgânico particulado, carbono orgânico associado a fração mineral do solo e de parâmetros radiculares, em um transecto, na sub-bacia hidrográfica Micaela, RS.

3.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- i) Determinar a densidade, a porosidade total, a macroporosidade, a microporosidade, a resistência mecânica à penetração e a granulometria dos solos;
- ii) Quantificar os teores de carbono orgânico nas frações granulométricas do solo separando o carbono orgânico total, carbono orgânico particulado e carbono orgânico associado aos minerais;
- iii) Por meio do processamento de imagens, quantificar os atributos radiculares como área superficial, volume, comprimento e diâmetro médio;
- iv) Relacionar parâmetros da qualidade estrutural do solo com os teores de carbono orgânico e com avaliações dos parâmetros radiculares;
- v) Verificar a distribuição espacial dos atributos físicos, do carbono orgânico total do solo e do sistema radicular e;
- vi) Elaborar mapas de distribuição espacial dos atributos radiculares no perfil de solo com a utilização de métodos de interpolação (krigagem ou ponderação do inverso da distância, IDW).

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Indicadores de qualidade do solo

Os usos e a ocupação do solo, em especial, a prática da agricultura/pecuária interferem em grandes extensões territoriais, sobre nichos ecológicos, em razão da retirada da vegetação natural e, consequente pelo estabelecimento, principalmente, de monoculturas (DE-POLLI; PIMENTEL, 2006). Os componentes do manejo são atividades que podem exercer influência na qualidade do solo (HAMZA; ANDERSON, 2005).

Esses impactos ambientais no solo, podem alterar diretamente sua estrutura e atividade biológica e, consequentemente, sua fertilidade, com reflexos nos agroecossistemas, podendo prejudicar a qualidade e a produtividade das culturas (CARNEIRO et al., 2009). De acordo com BAVOSO et al. (2010), a compreensão e a

quantificação do impacto do uso e manejo do solo na sua qualidade são fundamentais no desenvolvimento de sistemas sustentáveis.

Em pesquisas que avaliam as relações entre agricultura e o meio ambiente é crescente a necessidade de adoção de critérios que possam avaliar, de forma correta, as condições atuais bem como as ideais do solo, ou seja, condições naturais sem a interferência antrópica (GOMES; FILIZOLA 2006).

Torna-se essencial que se disponha de parâmetros de sustentabilidade e que esses funcionem paralelamente, quantificando e indicando o grau de conservação ou degradação solo (DE-POLLI; PIMENTEL, 2006).

De acordo com Bochner (2007), embora existam vários atributos que possam ser usados como indicadores, nem todos atendem a critérios, como sensibilidade às alterações de manejo, integração com as funções do solo, praticidade e baixo custo de determinação. Estudos reforçam que esses indicadores devem estar altamente correlacionados com a função de interesse e sua medição deve ser confiável e reproduzível (RABOT et al., 2018).

Diversos estudos sugerem os seguintes parâmetros para avaliar a qualidade do solo, sendo eles: a densidade do solo, a porosidade total, macroporosidade, microporosidade, resistência mecânica à penetração, carbono orgânico total e o sistema radicular (RUSSEL; GOSS 1974; SANTOS; SINGER; EWING 2000; TOMM, 2003; LIMA et al., 2004; DEBIASE et al., 2008; HERMLE et al., 2008; VEZZANI; MIELNICZUK 2009; IORI et al., 2012, CARDUCCI et al. 2013).

A densidade do solo (D_s) é considerada um indicador da degradação (BI et al., 2014), principalmente por mensurar o estado de compactação ou adensamento de um solo (CAMARGO; ALLEONI, 1997; DIAS JÚNIOR; 2000), diretamente relacionada à retenção e armazenamento de água, ao movimento de água, a aeração do solo e ao desenvolvimento do sistema radicular (REICHARDT; TIMM, 2012). Alterações na D_s podem ocorrer devido a forças naturais, agindo lentamente no solo, como a eluviação de argilas (BELTRAME; TAYLOR, 1980) e do pisoteio e do pastejo animal em diferentes condições de umidade promovidas pela pecuária (FLORES et al., 2007), pelas atividades de preparo do solo, semeadura e colheita (MAZURANA et al., 2011; PANZIERA 2018).

O estudo D_s visando a avaliação da qualidade do solo é muito comum em escala de propriedades (PAIVA 2016), porém tem se tornado cada vez mais

frequente na avaliação da qualidade do solo em escala de bacias hidrográficas (OLIVEIRA, 2015; SOUZA et al., 2016; SHE et al., 2017; SILVA, 2018).

Com relação aos espaços vazios do solo e, de acordo com Leão (2002), quando a porosidade de aeração é inferior que 10%, a taxa de fluxo de oxigênio em direção ao sistema radicular das plantas é severamente prejudicada afetando, assim, os processos fisiológicos, metabólicos e, conseqüentemente, o crescimento das raízes das plantas.

Compreender a porosidade do solo é de fundamental importância para o manejo racional da água, visto que o movimento de água esta intimamente relacionada com a porosidade do solo. Segundo Ferreira (2010), a importância desse conjunto de poros depende, do tipo de cultivo, das condições climáticas, do lençol freático, da possibilidade de irrigação e do controle ambiental.

A resistência do solo à penetração (RP) é um parâmetro que pode estimar o impedimento mecânico que o solo oferece ao crescimento das raízes, sendo determinada por um penetrômetro (VOORHEES, 1983). De acordo com Panziera (2018), este atributo relaciona a qualidade estrutural do solo com o sistema radicular das plantas, podendo ser um indicador direto de condições favoráveis ou desfavoráveis para o desenvolvimento radicular.

Estudos evidenciam uma forte relação entre RP, conteúdo de água, densidade, teor de argila e de matéria orgânica (TORMENA et al., 2004; RIBON; TAVARES FILHO, 2004). Valores elevados deste atributo físico podem influenciar no crescimento das raízes, em comprimento e diâmetro (MEROTTO; MUNDSTOCK, 1999).

Frequentemente na literatura científica o valor de 2 MPa tem sido empregado como crítico para o crescimento das plantas (LAPEN et al., 2004; BLAINSKI et al., 2008; GUIMARÃES et al., 2013; LIMA et al., 2018; COLUMBI et al., 2018.), ainda que 2,5 MPa tenha sido utilizado em solos sob pastagem (LEÃO et al., 2004) e 3 MPa em solos sob florestas (ZOU et al., 2000). O valor de 3,5 MPa foi considerado crítico por Tormena et al. (2007) em solo sob plantio direto.

O carbono orgânico é o principal elemento na composição da matéria orgânica do solo. É proveniente dos microrganismos vivos e mortos, de resíduos vegetais e animais parcialmente decompostos, produtos de sua decomposição e substâncias orgânicas microbiológicas e/ou quimicamente alteradas (MEURER, 2012). Sendo considerado um componente essencial nos diversos processos físico-

químicos e biológicos de ecossistemas terrestres, dentre os quais, se destacam a estruturação do solo, ao suprimento de nutrientes, é fonte de energia para os microrganismos, à redução da contaminação de água de superfície e subterrânea pelo fenômeno de adsorção de poluentes, afetando a disponibilidade de ar e água às raízes das plantas e o desenvolvimento do sistema radicular (SILVA; PASQUAL, 1999; CONCEIÇÃO et al., 2005), razão pela qual pode ser considerado um indicador de qualidade do solo (CHERUBIN et al., 2015).

De acordo com Cruz et al., (2010), a estabilidade estrutural do solo está associada a matéria orgânica, verificando-se menor risco de degradação estrutural e de compactação em solos com maiores teores de carbono orgânico total. Pesquisas têm demonstrado variações no teor do carbono orgânico em decorrência da influência do manejo, especialmente, em sistemas que utilizam o revolvimento antes da implantação de culturas, provocando perturbação física, química e biológica do solo, (SIST et al., 2003; TEXEIRA et al., 2010).

Diante desses pressupostos, diversos pesquisadores, utilizam a distribuição do teor de carbono orgânico em profundidade, como indicador de qualidade ambiental ou mudança de uso e manejo do solo (FIGUEIREDO et al., 2010; SALTON et al., 2011).

Apesar da relevância do tema, também há carência de informações sobre a influência do teor de carbono orgânico (COT), densidade (Ds), Porosidade total PT, macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e resistência a penetração (RP), de solos brasileiros, principalmente no que se refere a avaliação da variabilidade e dependência espacial desses em sub-bacias hidrográficas com diferentes sistemas de uso e manejos e classes solo distintas.

As avaliações dos sistemas radiculares de plantas, também, podem ser consideradas um indicador sensível de redução na qualidade do solo e consequentemente refletir em diferentes condições de perturbação provenientes de ações antrópicas (SIX et al., 2004; SALTON; TOMAZI, 2014), podendo subsidiar a compressão e a identificação de diferentes padrões de crescimento de culturas, auxiliando na tomada de decisões (FREDDI et al., 2009).

De acordo Salton et al. (2008), as raízes, além de serem responsáveis pela absorção de água e pela sustentação da planta, são parte essencial nos processos de formação e estabilização dos agregados do solo permitidos pelos mecanismos físicos e químicos.

As interações solo-raiz e seus efeitos ambientais, têm sido mencionadas (CARDUCI et al. 2014), uma vez que, os usos e manejos do solo promovem a compactação e resultam interferências no desenvolvimento vegetal (VALADÃO et al. 2015).

O nível de compactação e a umidade podem restringir ou até impedir o crescimento radicular (SOUZA et al., 2006; BENGOUGH et al., 2006). A redução do teor de água no solo eleva a coesão entre partículas acarretando no incremento da resistência à penetração e a redução da pressão hidrostática das células das raízes promovendo a diminuindo a força de contato exercida pela coifa e região meristemática, restringindo o crescimento radicular (HAMZA; ANDERSON, 2005).

Segundo Kaestner et al. (2006) o desenvolvimento do sistema radicular e a estrutura do solo estão intimamente associados, visto que um tem influência sobre o outro. O crescimento das raízes depende de solos com uma estrutura adequada, com uma porosidade satisfatória para manutenção dos fluxos de ar e água. A estrutura do solo, por sua vez, também é influenciada pelo desenvolvimento das raízes que propiciam aproximação entre as partículas, a incorporação de matéria orgânica estando diretamente associados à formação dos agregados. Descobrir o limiar onde o ambiente do solo controla a distribuição espacial das raízes e como o crescimento da raiz modifica a estrutura do solo, é trabalho bem complexo.

O reconhecimento da ocorrência dessas interações (raiz-solo), bem como a busca por respostas das espécies vegetais ao seu ambiente, demonstram a necessidade de avaliar o sistema radicular visando a aquisição de informações fundamentais para a compressão dos processos resultantes dessa interação (GLIŃSKI et al., 2008; FREDDI et al., 2009).

Os métodos clássicos de avaliação do sistema radicular como: da escavação, do monólito, do trado, do perfil, do tubo ou paredes de vidro, como aqueles que empregam alta tecnologia como fósforo-32 ou rubídio-86 como marcadores, radiografia de nêutrons (ELLIS, 1968; BOHM, 1979; KÖPKE, 1981; RUSSEL; WILLAT et al., 1978) foram desenvolvidos buscando analisar o comportamento das raízes no perfil do solo. Porém, a maioria desses métodos são dispendiosos e pouco precisos (DEDORDI, 2015).

Jorge; Crestana (2007) com intuito de aumentar a precisão e otimizar o tempo de análise dos atributos radiculares, sugerem técnicas de processamento e análise de imagens, independente do método de coleta a ser utilizado.

O primeiro estudo, realizado no Brasil, uniu técnicas de processamento e análise de imagens digitais ao método do perfil, com quantificação de comprimento de raízes (CRESTANA et al., 1994) indicando uma ferramenta para o estudo detalhado do sistema radicular aplicado às diversas áreas agrônômicas (FANTE et al., 1994).

Estudos recentes evidenciam resultados satisfatórios dessa proposta metodológica em relação à avaliação visual através de quadros reticulados (SALTON et al., 2008; CARDUCCI et al., 2013; VALADÃO et al., 2015). No entanto, se fazem necessárias pesquisas, com diversas culturas, bem como de áreas naturais, que permitam compreender e entender melhor a interface solo-raiz.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) disponibiliza gratuitamente o software SAFIRA para a análise de raízes e fibras através de processamento de imagens digitais. De acordo com Jorge; Santos (2010) essa iniciativa tem como propósito fomentar o uso dessa tecnologia e promover o avanço de pesquisas do sistema radicular.

Ferramentas como esta permitem que com a aquisição de imagens digitais dos perfis, pode-se determinar o comprimento, o volume, o diâmetro médio, a distribuição e a área ocupada pelas raízes (CRESTANA et al., 1994; GUIMARÃES et al., 1996; JORGE; CRESTANA, 1996; JORGE; SILVA, 2010). Estes atributos têm sido utilizados na avaliação da eficiência na absorção de água e de nutrientes das plantas (JORGE; RODRIGUES 2008) e nos efeitos da compactação do solo (FREDDI et al., 2009; VALADÃO et al., 2015). O comprimento radicular tem sido de maior importância para estudos da arquitetura e da dinâmica radicular (DOWDY et al., 1995; ROSSIELLO et al., 1995; JORGE; SILVA, 2010).

De acordo com Quinto et al. (2016), o sistema radicular possui fundamental importância nas interações que ocorrem entre o solo, as plantas e os organismos vivos. Ter conhecimento sobre sua distribuição é imprescindível para ser adotado o uso mais adequado de práticas de cultivo e manejos sustentáveis.

Compreender a distribuição espacial dos atributos do solo, ou seja, sua disposição no espaço, é essencial para a gestão dos recursos naturais (solo-raiz) (ROSA FILHO et al., 2011; CAMPOS et al., 2013; CARDUCCI et al., 2014), possibilitando monitorar o comportamento dos seus atributos, especialmente em ambientes naturais, afim de evitar a perda de informações em ambientes não alterados (GOMES et al., 2007).

A utilização de ferramentas geoestatísticas no estudo da variabilidade espacial do sistema radicular pode auxiliar na compreensão da relação desse atributo com fatores externos como: a classe de solo, o sistema de uso e manejo, além do local de aplicação dos insumos agrícolas (MOTTA et al., 2006).

Raros têm sido os estudos que utilizam essas ferramentas para analisar os atributos radiculares. Pesquisas têm sido predominantemente da parte aérea das plantas em função das dificuldades existentes para investigações do sistema radicular. Compreender a distribuição espacial do sistema radicular bem como suas relações com outros atributos do solo pode promover informações relevantes para a gestão sustentável do recurso natural.

4.2. Variabilidade espacial de atributos de solo e de planta

A variabilidade espacial dos atributos dos solos é o resultado de processos pedogenéticos como: material de origem, relevo, clima, tempo e organismos, ou devido à variação do manejo, sendo neste caso de origem antropogênica (MCGRAW, 1994).

Diversas pesquisas da área agrônômica abordam a variabilidade dos atributos do solo por meio da estatística clássica, a qual pressupõe que as observações de um dado são independentes entre si, desconsiderando sua localização na área (BOTTEGA et al, 2013), condição que pode ser comprometida em razão da dependência espacial (YAMAMOTO; LANDIM, 2013; PANZIERA, 2018).

A geoestatística é uma ferramenta de utilidade na ciência do solo para caracterizar a variação espacial de seus atributos. Essa ferramenta possibilita diferentemente da estatística clássica, separar a variabilidade explicada, pela relação existente entre as amostras, e a variabilidade causal. Sendo que sua aplicação pode diminuir o número de amostras necessárias, para descrever as características de um determinado local, reduzindo custos de levantamento, mantendo a precisão das estimativas (VIERA et al., 1983).

Estudos comparativos entre técnicas de geoestatística e estatística clássica para caracterizar a variabilidade espacial em solos demonstram maior eficiência nos resultados obtidos através das técnicas de geoestatística, proporcionado menor variância destas estimativas, quando aplicados em áreas maiores em decorrência dificuldade de controle em experimentos a campo (MCBRATNET; WEBSTER 1983; WOJCIECHOWSKI, 2006).

Uma das formas mais eficientes de investigar a variabilidade espacial do solo é o uso da análise de variáveis regionalizadas (WARRICK; NIELSEN, 1980; GOOVAERTS, 1997; VIEIRA, 2000; VIEIRA et al., 2002; COUTO et al., 2007; WEBSTER; OLIVIER, 2007; REICHARDT; TIMM, 2016), técnica fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas.

A premissa dessa teoria refere-se a caracterizar os fenômenos que apresentam uma distribuição no espaço como variáveis que dependam de um valor e da sua posição espacial. Para essa caracterização é utilizado o conceito de variáveis aleatórias que assumem um atributo numérico com certa distribuição de probabilidade e função aleatória, uma vez que, segundo Isaaks; Srivastava (1989) são as variáveis aleatórias, regionalizadas e assume-se que a dependência entre elas é especificada por algum mecanismo probabilístico, com determinação das incertezas associadas (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

A geoestatística tem com ideia central que as medidas mais próximas tendem a ser mais parecidas do que valores observados em locais distantes. Esse procedimento permite descrever a variação de um ponto para outro e mensurar esta correlação espacial, fornecendo métodos e incorporando-a na estimação e na inferência (GOTWAY; HARTFORD, 1996).

As técnicas de geoestatística que testam independência (ou dependência) entre as amostras são o correlograma e o semivariograma. Essas medidas que avaliam a dependência tem como princípio a verificação da similaridade ou da dissimilaridade das observações (WEBSTER; OLIVER, 2007).

O semivariograma é um recurso da geoestatística que permite verificar e modelar a dependência espacial de uma variável. Uma aplicação direta do semivariograma é a utilização de informações geradas por ele na interpolação, ou seja, na estimativa de dados e, posterior, mapeamento da variável (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978). O interpolador que utiliza o semivariograma em sua modelagem é chamado de krigagem, sendo requisito a constatação de dependência espacial para aplicação deste método.

Segundo Nielsen; Wendroth (2003) a krigagem é considerada o melhor método de interpolação linear não tendencioso, pois considera os parâmetros do semivariogramas e é baseado na variância mínima entre as amostras. Para a realização da interpolação por krigagem são atribuídos pesos aos valores dos pontos amostrais. Estes pesos variam em função da distância que separa o ponto a

ser estimado e o ponto de valor conhecido. Os pesos são atribuídos considerando-se o modelo do semivariograma. O valor do ponto desconhecido é então calculado pela solução de um sistema de matrizes (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978; ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

No entanto é comum observar na literatura científica pesquisas que não conseguiriam detectar a dependência espacial de alguma variável. Nesses casos para estimar podem ser utilizados métodos de interpolação determinísticos como: método poligonal, triangulação e inverso do quadrado das distâncias, dentre outros. Entretanto, estes métodos não estimam o erro associado a cada valor interpolado, o que pode ser obtido por meio do interpolador geoestatísticos (WEBSTER; OLIVER, 2007).

Essas ferramentas permitem avaliar a distribuição espacial dos atributos do solo, possibilitando monitorar o comportamento, especialmente em ambientes naturais, a fim de evitar a perda de informações em ambientes não alterados (GOMES et al., 2007), além de auxiliar na tomada de decisão no gerenciamento ambiental de recursos naturais.

4.3. Estudos de atributos de solo e de planta em escala de bacias hidrográficas

A bacia hidrográfica é uma área de captação natural das águas pluviais que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída. Áreas com essa característica são resultantes da interação dos elementos da natureza como: geológicos, climatológicos, topográficos, biogeográficos e pedológicos (FROTA, 2012), constituindo uma unidade de estudo fundamental para a conservação do meio ambiente (ALVES, 2000), bem como suporte técnico e científico para o planejamento de ações de uso e de ocupação do solo.

No entanto, existe uma carência de informações para entender os fenômenos naturais, de maneira ampla e integrada, contribuindo para desequilíbrios ambientais (ALVARENGA; PAULA, 2000) e, problemas de conservação do solo e da água (IORI et al., 2012).

Compreender a distribuição do comportamento espacial dos atributos do solo em bacias hidrográficas torna-se necessário para a adoção e para a manutenção de

um sistema de gestão sustentável, bem como, proporcionar subsídio técnico para recuperação e conservação desses ambientes (BRYANT et al., 2008).

O conhecimento da variabilidade espacial de um solo, além de caracterizar uma região, gera uma estimativa do parâmetro sem viés, sendo possível planejar ações de manejo e conservação de maneira mais eficaz (BOTTEGA et al., 2013).

Silva (2018) destaca que os principais métodos de estudos em bacias hidrográficas, como as amostragens em malha (“gride”) e o uso de transeção, analisados pelas técnicas geoestatísticas têm sido utilizados para caracterizar e monitorar processos e atributos do solo.

Pesquisas utilizando a método de amostragem em transeção, com o intuito de analisar o comportamento espacial dos atributos do solo ao longo da catena de bacias e sub-bacias hidrográficas, têm sido úteis para monitorar as alterações ocorridas e consequentemente traçar estratégias com premissa de evitar ou reduzir impactos adversos ao meio ambiente.

Yang et al. (2017) realizaram amostragem em transeções combinando técnicas estatísticas clássicas e geoespaciais (autocorrelograma e semivariograma) para avaliar o espaço padrão e heterogeneidade da umidade do solo. Esta pesquisa destacou a importância dos tipos de uso do solo e dos atributos topográficos na heterogeneidade espacial da umidade.

O estudo realizado por Gomes et al. (2007) na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, MG, avaliou por meio da geoestatística, o uso das terras e suas implicações na variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos como densidade, matéria orgânica e frações texturais (areia, silte e argila), constando que o manejo, o uso e a ocupação atual, não consideram as características de aptidão agrícola da bacia hidrográfica.

Nicodemo et al. (2018) avaliaram o efeito do uso da terra em sistemas agroflorestais, pastagem e mata nativa, sobre as propriedades físicas do solo, amostrados em transeção, em São Carlos, SP. Os autores observaram as melhores condições físicas na área sob mata, justificando o fato, em razão da constatação de elevados teores de matéria orgânica, que por sua vez, reduzem a densidade promovendo uma melhor estruturação do solo o que por consequência, favorece o desenvolvimento de sistemas radiculares das espécies presentes na área.

Silva (2018), na sub-bacia hidrográfica Micaela, RS, avaliou o comportamento de atributos físicos do solo ao longo da catena, a partir de ferramentas da

geoestatística em uma transeção observando que a maioria das variáveis é estacionária e apresenta dependência espacial. Já a análise espectral não foi capaz de detectar frequência predominante nos atributos em estudo.

Eguchi et al. (2002) precederam a amostragem em transeção de 100 metros, paralela ao curso d'água no município de Lavras, MG, com objetivo de avaliar a variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas de um solo aluvial. A partir da aplicação de ferramentas da estatística clássica e da geoestatística foram observados nos semivariogramas ajustados aos modelos esférico, gaussiano e exponencial, os alcances de 15, 49,5 e 14,5 m para areia, argila e silte, respectivamente, apresentando forte dependência, segundo classificação de Cambardella et al. (1994).

Estudos dessa natureza tem se tornado cada vez mais frequentes, pois permitem conhecer detalhadamente a variabilidade e a ocorrência dos processos naturais e antrópicos nos atributos do solo, validando a adoção de pesquisas em escala de bacia hidrográfica que auxiliem na compreensão dos processos pedológicos.

Segundo Oliveira (2015), informação e síntese de diversas abordagens são necessárias para estudar características da multiescala que são o produto de coexistência, hierarquia, complexidade e, em alguns casos, a auto-organização. Compreender as relações entre fatores físicos, químicos e biológicos em diferentes escalas são essenciais para a agricultura, engenharia, hidrologia e meio ambiente. O surgimento de uma abordagem mais holística na ciência pode facilitar a compreensão da variabilidade temporal e espacial (LOGSDON et al., 2008) possibilitando assim, um manejo sustentável do meio ambiente.

5. MATERIAL E METÓDOS

5.1. Localização

A pesquisa foi desenvolvida na área que compreende a Bacia Hidrográfica Mirim – São Gonçalo, em uma sub-bacia, denominada Micaela, de 37,32 km², localizada na zona rural do município de Pelotas, RS, com coordenada geográfica 31°37'50,32" de latitude Sul e 52°31'28,15" de longitude Oeste (Figura 1).

O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen (1948) realizada por Alvares et al. (2013) é do tipo subtropical úmido (Cfa), com média anual de precipitação de 1.385,6 mm. Os meses de Fevereiro e Julho apresentam as maiores médias mensais, com 189,7 e 129,5 mm, respectivamente. Os meses que apresentam menores médias mensais são: Março e Maio, com 90,6 e 99,3 mm, respectivamente. A temperatura média é de 12,5°C no mês mais frio e de 23,3°C no mês mais quente (SANTOS, 2013).

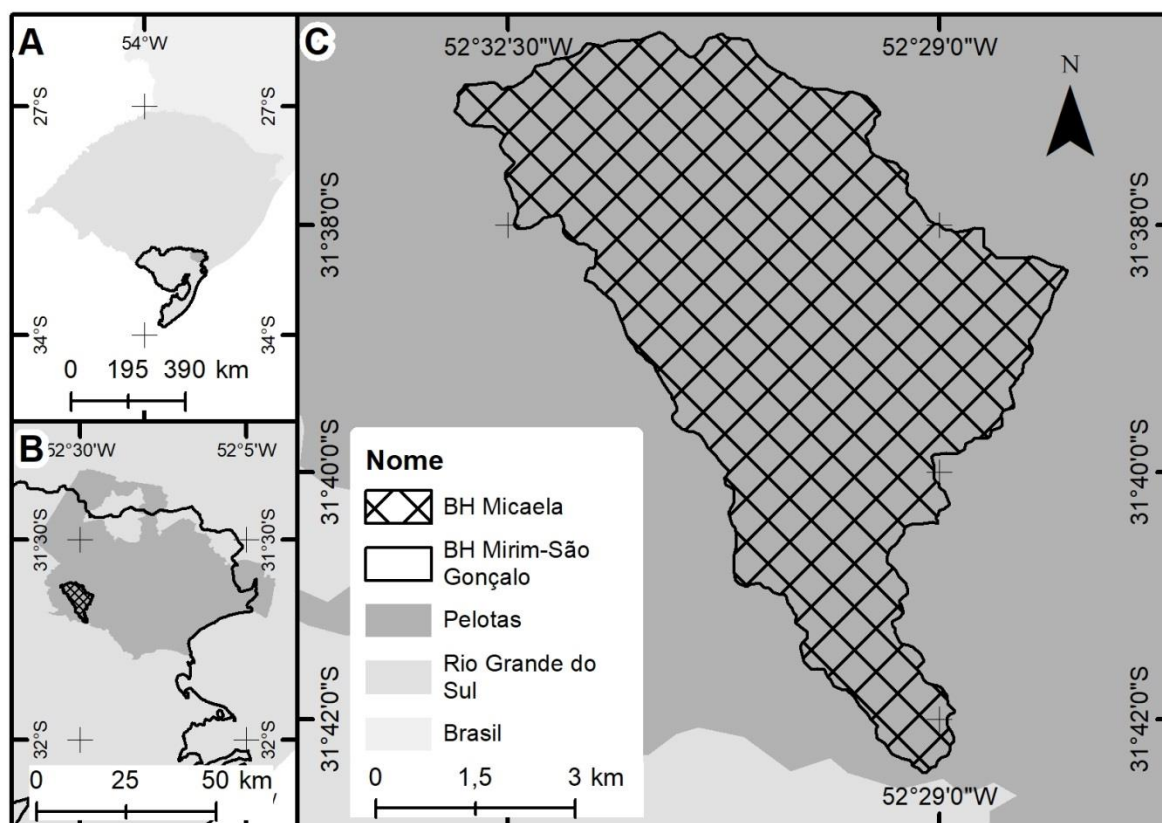


Figura 1 – Localização da sub-bacia hidrográfica Micaela, situada na Bacia Mirim – São Gonçalo, Pelotas, RS. Elaborado por: Stefan Domingues Nachtigall.

De acordo com o Plano Ambiental de Pelotas (2016), a área apresenta um sistema ramificado de cursos hídricos, intermitentes e perenes. A Figura 2 apresenta a hidrografia da sub-bacia.

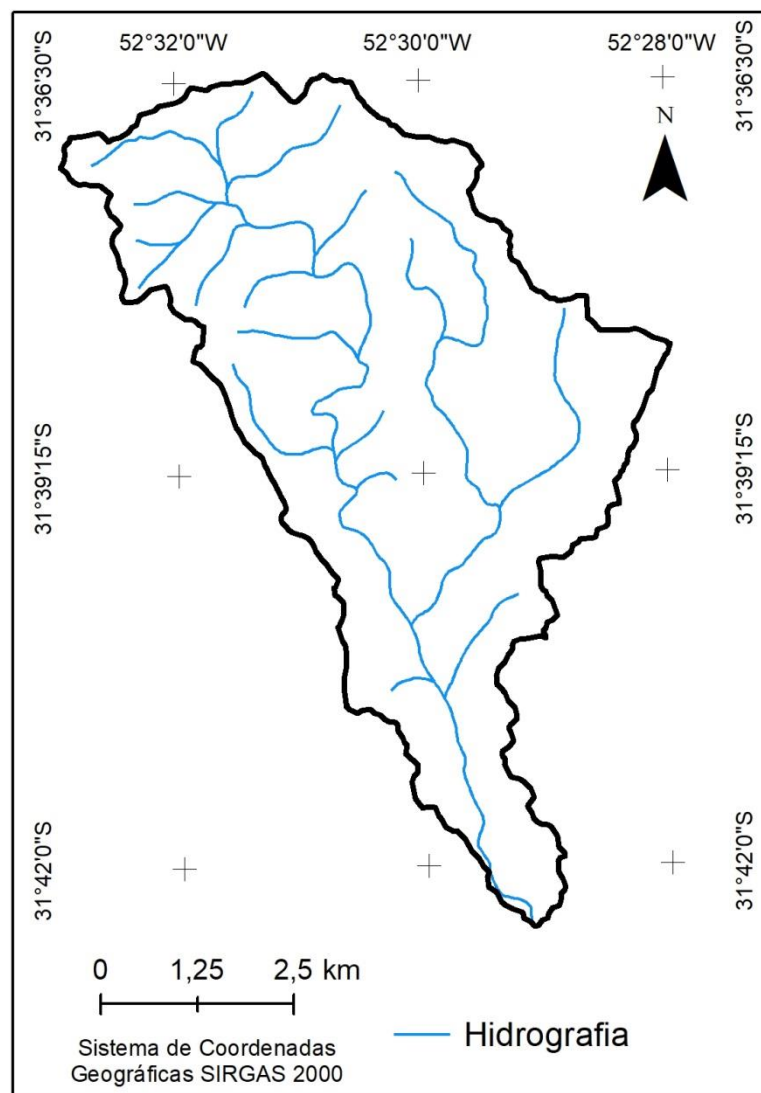


Figura 2 – Mapa hidrografia da sub-bacia Micaela, Pelotas-RS. Elaborado por: Stefan Domingues Nachtigall. Fonte: FEPAM (2005)¹.

Com relação a topografia da área, apresenta variações de altitudes de 23 e 334 metros. Na Figura 3 é indicado o gradiente de altimetria das diferentes regiões da sub-bacia.

¹ Mapa elaborado a partir da Preparação da Base Cartográfica do Rio Grande do Sul (1:250.000) para uso em SIG -Documentação Técnica – Biblioteca digital da FEPAM

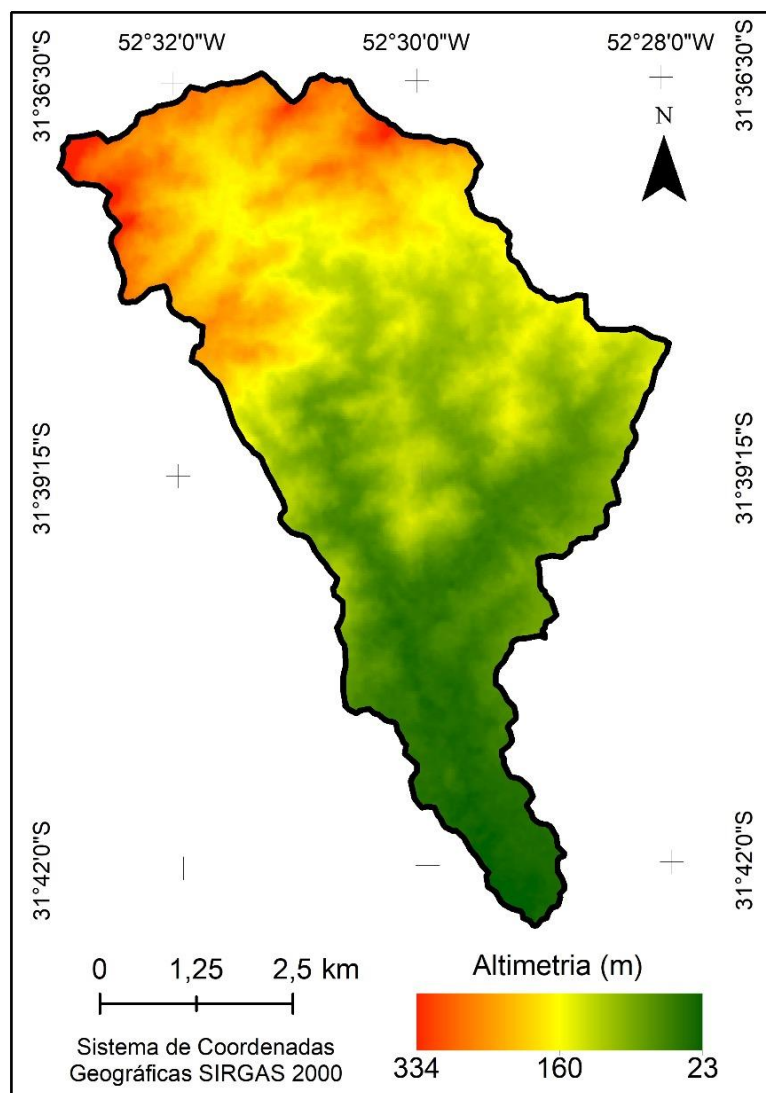


Figura 3 – Mapa de altimetria da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS. Elaborado por: Stefan Domingues Nachtigall.

Destaca-se que o solo da região apresenta classe quanto a resistência a impactos ambientais considerada “muito baixa”² conforme o mapa (Figura 4), utilizado pela Fundação de Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM), RS, com objetivo subsidiar e fornecer diretrizes técnicas para a gestão do uso dos solos (KÄMPF 2001).

² Os critérios levados em conta para a classificação dos solos quanto a resistências de impactos ambientais foram os seguintes: Fatores de solo: profundidade, textura, presença de gradiente textural A/B, drenagem natural, presença de lençol freático, presença de lençol suspenso. Fatores do terreno: risco de inundação, erodibilidade, relevo, declividade, aptidão agrícola.

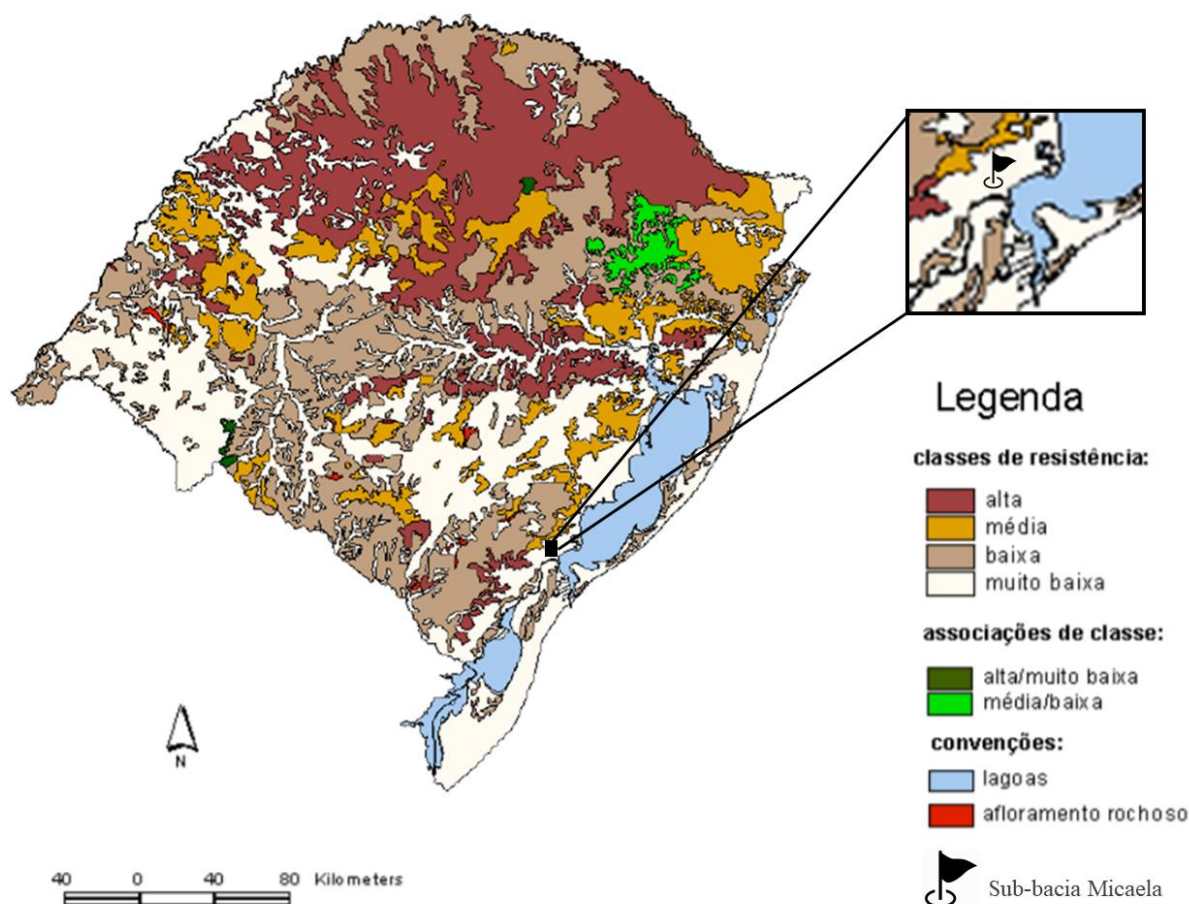


Figura 4 – Mapa de Classificação de Solos quanto a resistência a impactos ambientais, RS. Elaborado por: Nestor Kämpf. Fonte: FEPAM (2001).

Os principais solos ocorrentes nessa sub-bacia são: associações de Neossolo Litólico Distrófico e Argissolo Amarelo Distrófico (RLd1); associações de Planossolo Háptico Eutrófico e Argissolo Acinzentado Eutrófico (SXe2); associações de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico; e Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico (PVad7); associações de Argissolo Amarelo Distrófico e Neossolo Litólico distrófico (PAD4), (CUNHA et al., 2006) conforme representado na Figura 5.

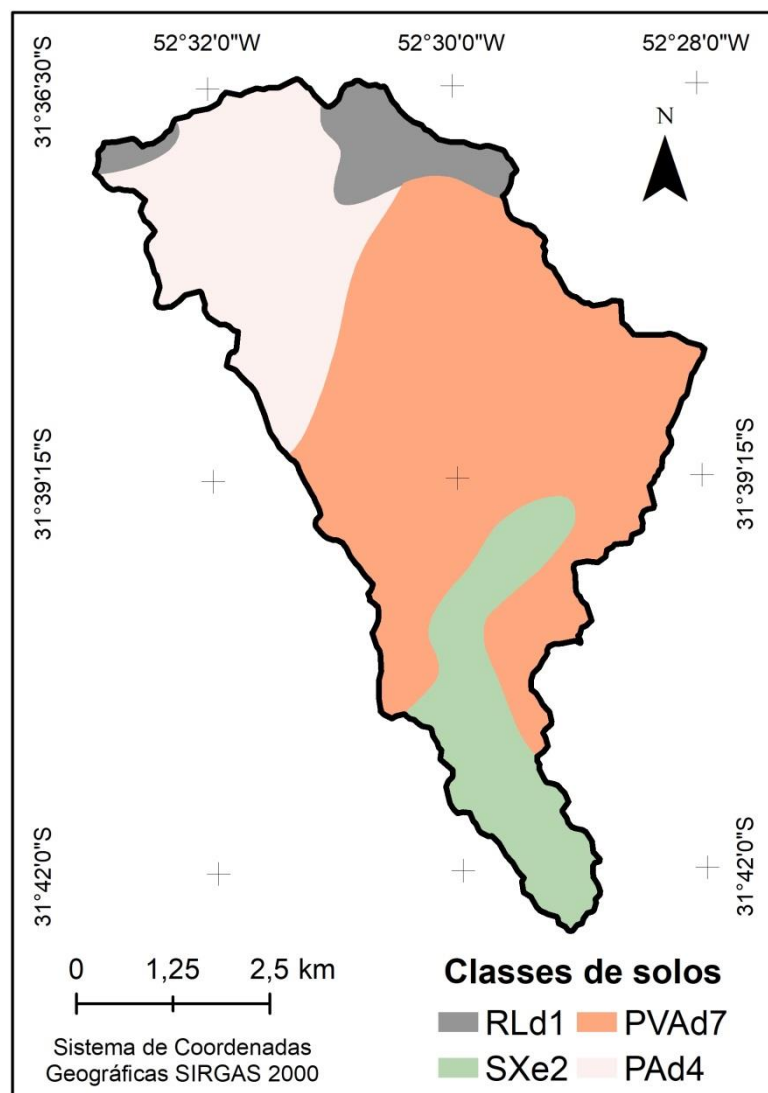


Figura 5 – Principais classes de solo da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS. Elaborado por: Stefan Domingues Nachtigall. RLd1 - associações de Neossolo Litólico distrófico e Argissolo Amarelo Distrófico; SXe2 - associações de Planossolo Háplico Eutrófico e Argissolo Acinzentado Eutrófico; PVad7 - associações de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico; e Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico; PAd4 - associações de Argissolo Amarelo Distrófico e Neossolo Litólico Distrófico

Os principais sistemas de uso e de manejo observados em campo foram: pastagens, soja, milho, pêssego, grama plantada, silvicultura, mata nativa e vegetação espontânea (Figura 6) nos sistemas de preparo convencional e semeadura direta.

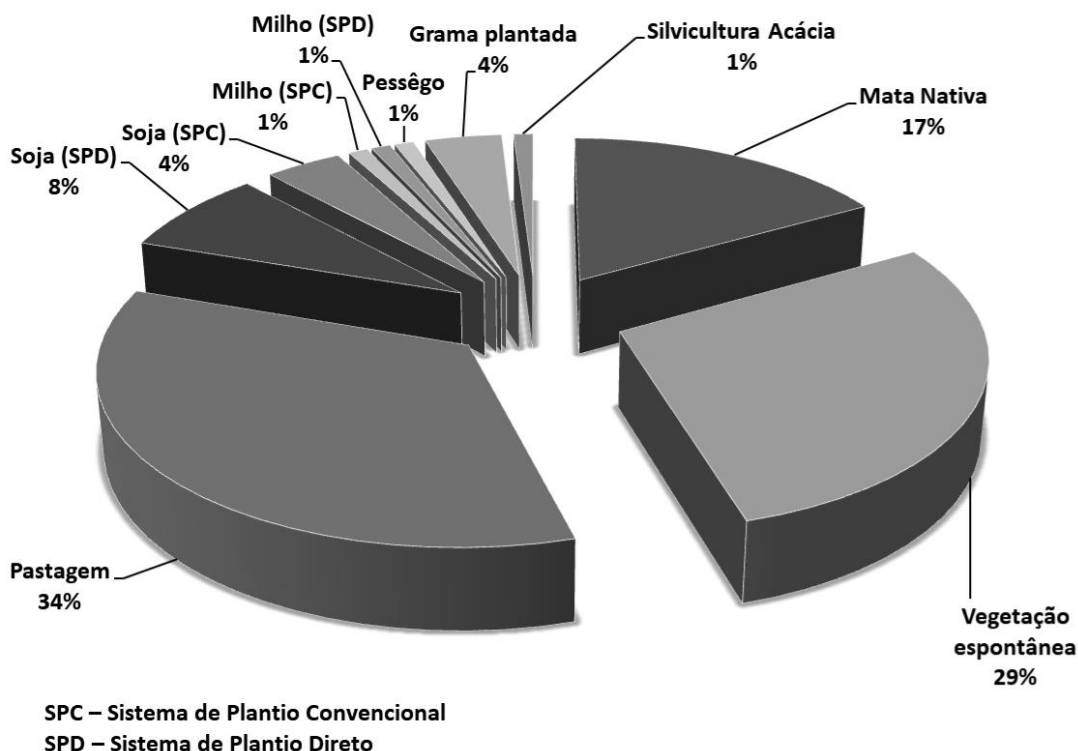


Figura 6 – Porcentagem de área ocupada por tipos de usos do solo ao longo da transecção na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

5.2. Avaliação de atributos

O método utilizado para a coleta de solos foi uma linha ao maior comprimento, na sub-bacia hidrográfica Micaela, chamado de “transecto”. A linha seguiu o sentido de jusante para montante na Bacia, englobando quatro classes de solos da região, com 11.200 metros. Foram coletadas amostras na camada superficial (0,00 a 0,10 m) em 101 pontos inseridos nesse transecto. Cada amostragem de solo foi efetuada a uma distância de aproximadamente 112 metros uma da outra (Figura 7). Concomitantemente utilizaram-se trincheiras, 18 pontos pré-determinados (Figura 8), inseridos no mesmo transecto, englobando as classes de solo mais representativas³ e vegetações predominantes⁴, para avaliação do sistema radicular e amostragem de solo nas camadas superficial (0,00 a 0,10 m) e subsuperficial (0,10 a 0,20 m).

³Classes de solo: RLd1 - associações de Neossolo Litólico distrófico e Argissolo Amarelo Distrófico; SXe2 - associações de Planossolo Háptico Eutrófico e Argissolo Acinzentado Eutrófico; PVad7 - associações de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico; e Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico.

⁴Vegetações predominantes: Pastagem (PA), Vegetação Espontânea (VE) e Mata Nativa(MN).
PA - pastagens com predomínio da cultura do azevém/aveia;
VE - caracterizadas por vegetações pioneiras, áreas de pousio, campo nativo não pastejado;
MN - Estepe arbórea aberta com floresta de galeria (especialmente mata ciliar).

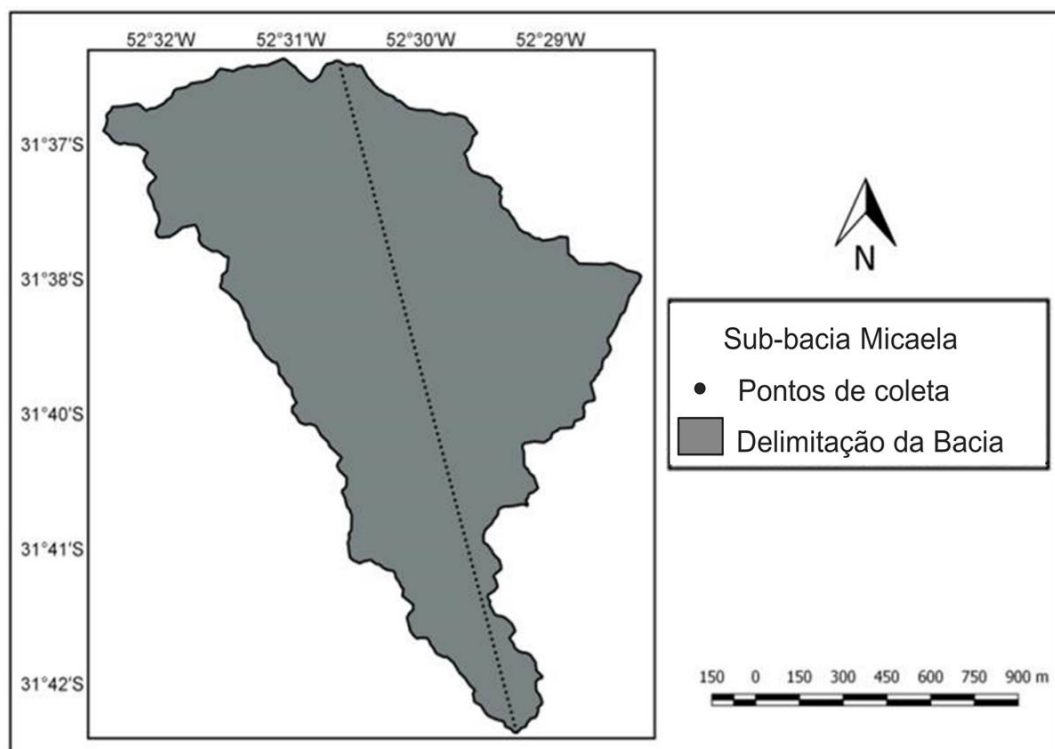


Figura 7 – Transecto georreferenciado com espaçamento (E) entre pontos de 112 metros para a realização das coletas de solo ao longo da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS. Elaborado por: Gabriel da Silva Lemos.

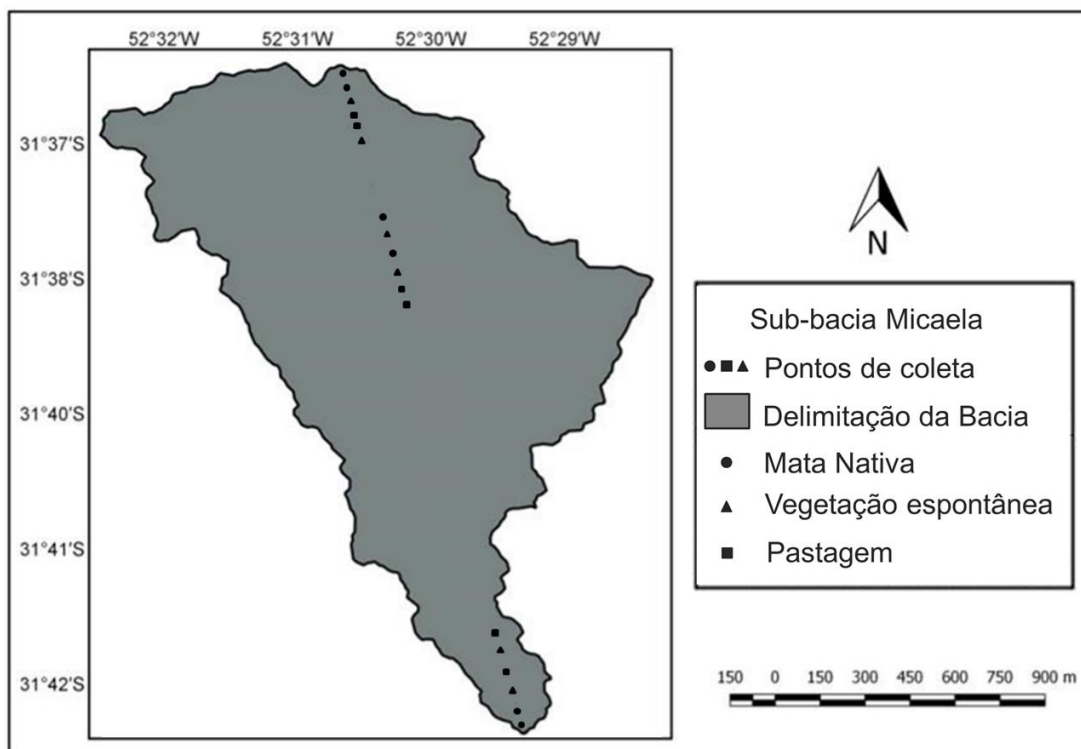


Figura 8 – Localização de trincheiras para aquisição das imagens do sistema radicular e coletas de solo ao longo da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS. Elaborado por: Gabriel da Silva Lemos.

Amostras de solo com estrutura preservada e não preservada nas camadas de 0,00 a 0,10 m e 0,10 m a 0,20 m, foram transportados para o Laboratório de Física do Solo da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM), da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), para determinação dos atributos do solo. O número de repetições de amostras de solo coletadas por ponto foi de 3. Além da coleta de dados em 18 trincheiras para a avaliação dos parâmetros radiculares.

A análise dos dados foi baseada levando em consideração espaçamento dos pontos amostrais, ou seja, 112 m (Figura 7) e as diferentes vegetações (Figura 8) e suas respectivas classes de solo. No primeiro caso caracterizou-se a distribuição espacial e a estrutura da dependência espacial dos atributos físicos e COT do solo na camada superficial. No segundo, a caracterização da distribuição espacial dos atributos radiculares, e sua correlação entre os atributos físicos, COT e suas frações, além de elaborar mapas de distribuição radicular por meio de métodos de interpolação (Krigagem ou IDW).

5.2.1 Avaliações de atributos físicos do solo

Para avaliação dos atributos físicos do solo, foram coletadas amostras com estrutura preservada (Figura 9) na posição intermediária da camada de 0,00 a 0,10 m e de 0,10 a 0,20 m, com o uso de anéis volumétricos de aproximadamente 5,0 cm de altura e 5,0 cm de diâmetro, as quais subsequentemente foram transportados para o Laboratório de Física do Solo da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM), da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), para determinação da densidade; da macroporosidade; da microporosidade; da porosidade total e da resistência mecânica à penetração.

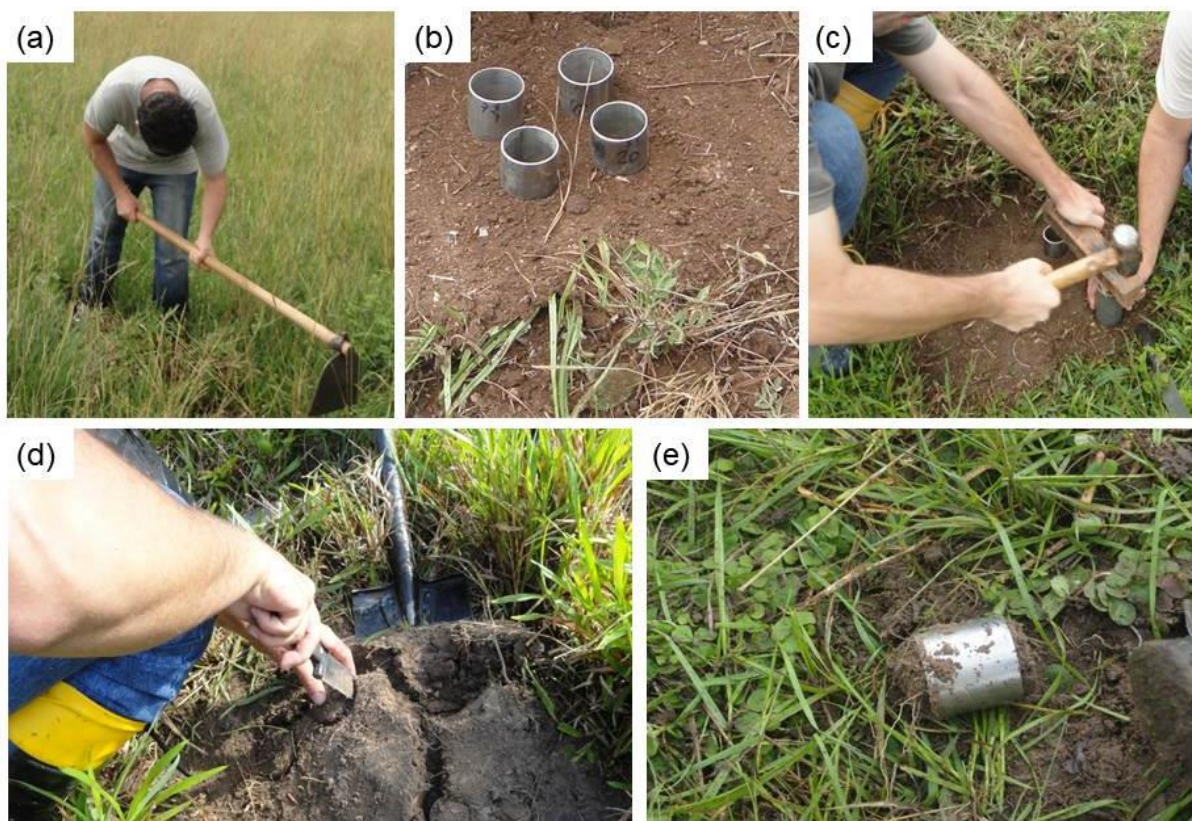


Figura 9 – Procedimento adotado para coleta de amostras indeformadas ao longo da transecção sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS. (a) remoção da vegetação da área superficial para o solo ser amostrado; (b) posicionamento dos anéis no solo para proceder a coleta; (c) inserção dos anéis no solo; (d) processo de remoção do anel e solo; (e) retirada de amostra de solo.

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico e a macroporosidade e porosidade total pela mesa de tensão, utilizando uma sucção de coluna de água a 0,60 m (EMBRAPA, 2011).

Para avaliação da resistência mecânica do solo à penetração (RP), as amostras foram saturadas por um período de 24 a 48 horas e submetidas a um potencial de -10 kPa em câmara de pressão de Richards (KLUTE, 1986). Depois de obtido o equilíbrio, entre a pressão aplicada e o conteúdo de água, cada amostra foi pesada e, determinada a RP, em três locais distanciados igualmente do centro de cada amostra, com uma velocidade de penetração de 10 mm min^{-1} (BRADFORD, 1980) utilizando um penetrômetro eletrônico, modelo MA 933, com atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um computador para aquisição e armazenamento de dados (Figura 10).



Figura 10 – Atuador eletrônico linear e a avaliação da resistência mecânica a penetração do solo. (a) vista geral do equipamento; (b) vista aproximada da inserção da haste na amostra. Fonte: Autor

Para determinação da granulometria foram coletadas amostras com a estrutura não preservada (Figura 11) nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 20 m (GEE; BAUDER, 1986).



Figura 11 – Procedimento adotado para coleta de amostras deformadas ao longo da transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS: (a) remoção da vegetação da área superficial para o solo ser amostrado; (b) inserção da pá no solo para extrair a amostra; (c) amostra de solo removida e (d) amostras de solo embaladas e identificadas. Fonte: Autor

5.2.2 Avaliações do Carbono Orgânico Total e Frações Granulométricas

Para avaliação do Carbono Orgânico Total (COT) e frações granulométricas (COp e Coam), foram utilizadas as amostras de solo com estrutura não preservada, oriundas das camadas de 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 20 m.

A determinação do teor de carbono orgânico do solo total (COT) foi realizada conforme o método proposto por Walkley e Black (1934), baseando-se na oxidação da matéria orgânica por dicromato em meio ácido.

O fracionamento granulométrico do carbono orgânico foi realizado segundo Cambardella; Elliott (1992). Vinte gramas de terra fina seca ao ar (TFSA) foram submetidos à agitação horizontal por 15 horas na presença de 60 mL de solução de hexametáfosfato de sódio na concentração de 5 g L⁻¹. A suspensão foi passada em peneira de 53 µm com o auxílio de jato de água. O material retido na peneira, que consiste no carbono orgânico particulado (COp) associado à fração areia, foi seco em estufa a 60°C, quantificado em relação a sua massa e analisado em relação ao teor de carbono orgânico. Enquanto o material restante com dimensões inferiores a 53 µm, consiste no carbono orgânico associado aos minerais (COam) das frações silte e argila, sendo obtido por diferença entre o COT e COp.

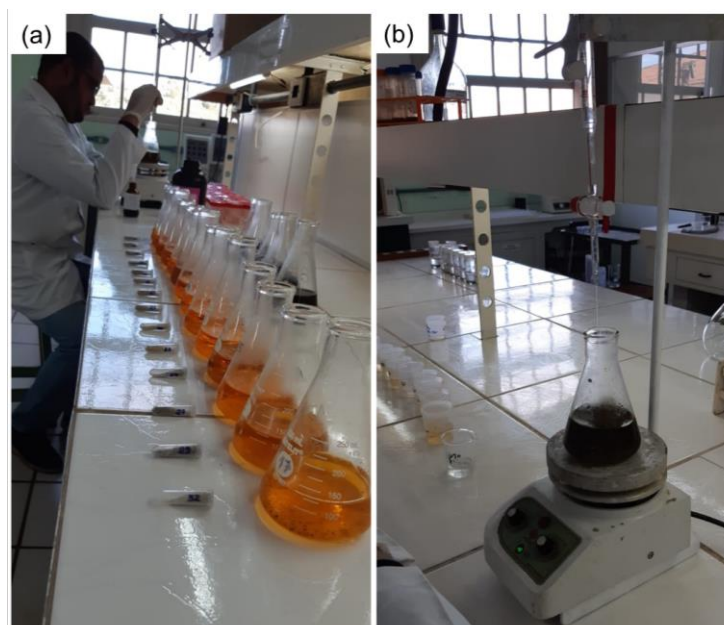


Figura 12 – Análise de carbono orgânico (a) vista das amostras preparadas para o procedimento de titulação; (b) aparatos utilizados na titulação.

5.2.3 Avaliação do sistema radicular

As avaliações digitais do sistema radicular foram realizadas pela técnica da análise do perfil (JORGE; SILVA, 2010), em trincheiras com auxílio de uma pá de corte reta, com dimensões 0,30 m x 0,20 m em pontos pré-determinados ao longo do transecto, nos meses de novembro e dezembro do ano de 2017, bem como, dos meses de janeiro e fevereiro do ano de 2018.

Em cada ponto, amostrado a trincheira transversal sob a linha do transecto, expondo a raiz, por meio de lavagem com água. Após a exposição das raízes em seção, o perfil foi dividido em quadrículas de 0,05 m, com auxílio de um gride de metal (quadro reticulado) com as dimensões 0,40 × 0,20 m, colocado em contato com o solo. Posteriormente efetuou-se a fotografia do perfil com uma câmera digital (12 megapixels). O gride é constituído por quadrículas com dimensão de 0,05 x 0,05 m, totalizando 32 pontos de amostragem por trincheira, somando na pesquisa, 576 amostras, compreendendo uma área total de 1,44 m². A Figura 13 demonstra de maneira simplificada o procedimento de amostragem mencionado em um dos pontos analisados.

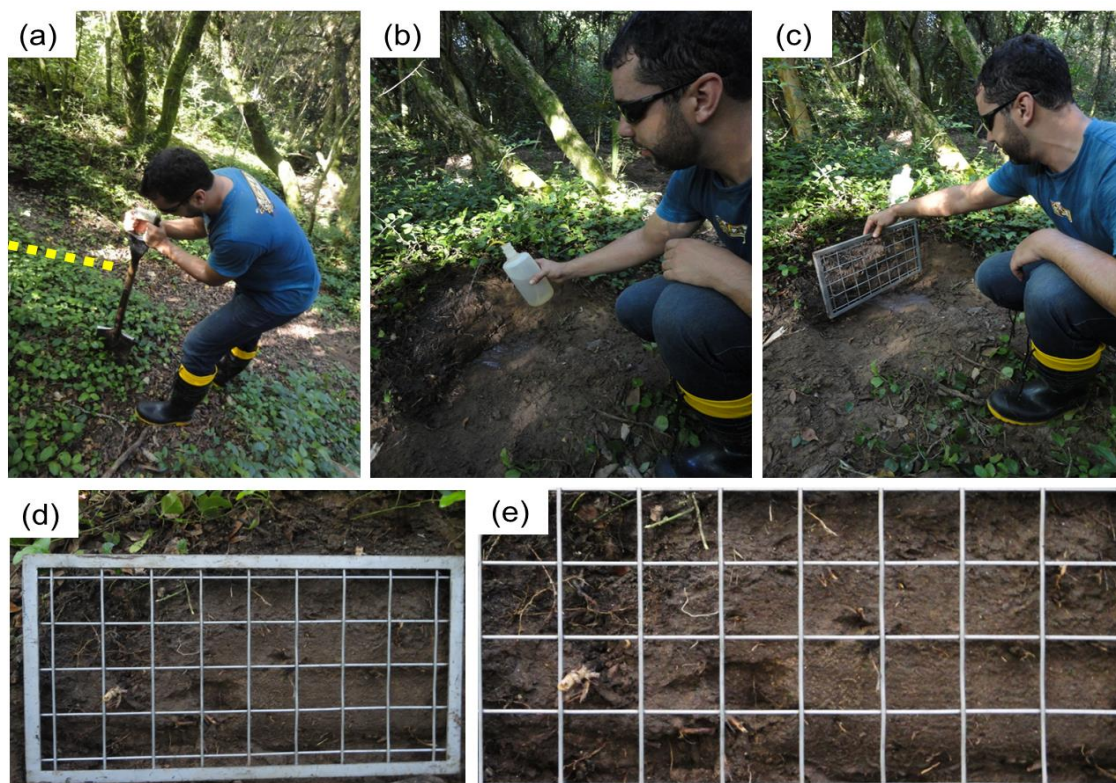


Figura 13 – Amostragem do sistema radicular ao longo do transecto na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS. (a) abertura da trincheira; (b) lavagem do perfil

com a finalidade de expor as raízes; (c) posicionamento do malha (gride); (d) Fotografia; (e) secção a ser avaliada. Fonte: Autor

Após a obtenção parcial das imagens⁵, essas foram corrigidas e alinhadas com o uso do software Adobe Photoshop CS6 12.0.4. Na sequência, as raízes foram estimadas nas camadas de 0,00 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m, e submetidas a quantificação das seguintes variáveis radiculares: volume (mm³), área superficial (mm²), comprimento (mm) e diâmetro médio (mm) por meio da técnica de limiarização (*thresholding*), com o programa Safira (JORGE; SILVA, 2010).

As raízes quantificadas na análise das imagens 2D foram distribuídas em três classes de diâmetros: 1 - raízes finas (< 1mm), 2 - raízes médias (≥ 1 e ≤ 2 mm), 3 - raízes grossas (> 2 mm).

Para a aplicação dos métodos de interpolação utilizou-se o centróide de cada unidade amostral do gride, para geração dos mapas de superfície com auxílio do software R (R CORE TEAM, 2017), a fim de buscar melhor visualização da distribuição das variáveis radiculares no perfil.

5.3. Análise dos dados

Variabilidade dos atributos físicos e do COT na camada superficial do solo ao longo da transecção

Primeiramente os dados foram submetidos à análise de estatística descritiva determinando-se as medidas de posição (média aritmética e mediana) de dispersão valores mínimo e máximo, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) e as que indicam o formato da distribuição os coeficientes de assimetria (Assimetria) e curtose (Curtose). Posteriormente, foi verificado o formato da distribuição de frequência dos atributos de solo utilizando como teste o kolmogorov-smirnov a 5% de significância. Este é um teste de aderência não paramétrico que verifica se o conjunto de dados pode ser considerado com uma distribuição de probabilidade, nesse caso, a distribuição normal. Todas as análises foram realizadas com o software BioEstat Versão 5.0 (AYRES et al., 2007).

⁵ As imagens dos perfis de solo utilizadas para estimar os atributos radiculares podem ser observadas no Apêndice A.

Além da estatística descritiva, utilizou-se para o ajuste da RP o modelo não linear proposto por BUSSCHER (1990), conforme equação (1), em que a RP é a resistência à penetração (MPa), θ_v é a umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}) e a, b e c são coeficientes empíricos de ajuste do modelo. A estimativa dos parâmetros do modelo de BUSSCHER (1990) (a, b e c), a partir do método iterativo de Gauss Newton e a análise descritiva dos resultados foram realizadas com o auxílio do programa estatístico SAS (Statistical Analysis System).

$$RP = a\theta_v^b D_s^c \quad (1)$$

Procedeu-se, também a análise da série de dados para a verificação da distribuição espacial, ponto a ponto, de cada uma das variáveis avaliadas ao longo da transecção, através de um gráfico de dispersão.

Após a execução da estatística exploratória foi realizada a análise da estrutura de dependência espacial dos atributos do solo através da confecção de semivariogramas. Essa ferramenta mensura e descreve a dependência espacial e expressa o grau de semelhança entre o ponto e os seus pontos vizinhos, sendo representado por um gráfico que mostra a estimativa das semivariâncias dos dados em relação ao número de vetores que os separa.

O estimador desenvolvido por Matheron (1962) é largamente utilizado para o cálculo da semivariância, em estudos pedológicos, descrito na equação abaixo:

$$y(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

Onde: $y(h)$ é a semivariância dos dados distantes entre si de um número h de vetores de espaçamento ou “lag”, $z(x_i)$ e $z(x_i+h)$ são os pares de valores medidos separados por um vetor h, $N(h)$ é o número de pares de valores $[z(x_i) - z(x_i+h)]$ separados pelo vetor h, e Z é a variável em estudo.

Segundo Cressie (1993); Li; Lake (1994) esse estimador foi elaborado a partir das médias dos quadrados dos incrementos do processo, e fundamenta-se no

método dos momentos, podendo ser influenciado pela presença de “outliers” não sendo considerado um estimador robusto.

Para as variáveis que não apresentaram distribuição de probabilidade normal foi utilizado o estimador, Cressie e Hawkins (1980), considerado mais robusto que o Matheron em relação à presença de outliers.

$$y(h) = \frac{\left[\frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} |(z(x_i + h) - z(x_i))|^{\frac{1}{2}} \right]^4}{(0,457 + \frac{0,494}{N(h)})} \quad (3)$$

Onde: $y(h)$ é o valor da estimativa da semivariância; $Z(x_i)$ é o valor da variável Z no ponto x_i ; $Z(x_i + h)$ é o valor da variável Z no ponto $x_i + h$; $N(h)$ é o número de pares separados por uma determinada distância h .

A confecção dos semivariogramas foram elaboradas pelo software R (R CORE TEAM, 2017).

Variabilidade dos atributos radiculares em diferentes classes de solos e usos

Inicialmente os resultados foram agrupados nas respectivas classes de solos sob os diferentes usos (PA, VE e MN), sendo que estes submetidos à análise estatística em duas etapas. A primeira foi empregada a estatística clássica onde se determinou a medida de posição, média aritmética, das variáveis físicas, carbono orgânico total e suas frações granulométricas e os atributos radiculares. Posteriormente foi realizado o teste de correlação de Spearman entre todas as variáveis. Todas essas análises foram realizadas com o software BioEstat Versão 5.0 (AYRES et al., 2007).

Na sequência os resultados dos atributos radiculares foram desagrupados, sendo avaliados individualmente⁶, esses resultados foram submetidos à análise estatística em duas etapas. A primeira foi empregada a estatística clássica onde se determinou as medidas de posição (média aritmética e mediana) de dispersão valores mínimo e máximo, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) e que indicam o formato da distribuição os coeficientes de assimetria (Assimetria) e curtose (Curtose). Conjuntamente foi verificada a normalidade dos dados aplicando o teste

⁶ Avaliação realizada por grade de raízes.

Shapiro Wilk ao nível de 5% de significância. Todas essas análises foram realizadas com o software BioEstat Versão 5.0 (AYRES et al., 2007).

Na segunda etapa, a análise dos dados foi fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas (geoestatística), compreendendo as funções de semivariogramas para os atributos radiculares. O estimador da semivariância utilizado foi o de Pairwise, Isaaks; Srivastava, (1989), sendo este definido pelo incremento da média dos valores ao quadrado, $[Z(x + h) + Z(x)]/2$, como denominador da diferença dos valores no estimador clássico de Matheron (2), equação abaixo:

$$y(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \left[\frac{z(x_i) - z(x_i+h)}{\frac{z(x_i) + z(x_i+h)}{2}} \right]^2 \quad (4)$$

Onde: $y(h)$ é o valor da estimativa da semivariância; $Z(x_i)$ é o valor da variável Z , no ponto x_i ; $Z(x_i + h)$ é o valor da variável Z no ponto $x_i + h$; $N(h)$ é o número de pares separados por uma determinada distância h .

Após os ajustes dos modelos dos semivariogramas teóricos, foram aplicados dois interpoladores para a confecção dos mapas. Nas variáveis que apresentaram dependência espacial foi utilizado o método da krigagem ordinária para interpolação dos valores e confecção dos mapas. Para a aplicação da krigagem assumiu-se que: eram conhecidas as realizações $z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_n)$ da variável aleatória $Z(x)$ nos locais $x_1, x_2, \dots, x_n$; e que o semivariograma da variável já havia sido determinado. Dessa forma, determinou-se z^* na posição x_0 . O valor estimado $z^*(x_0)$ é dado pela equação 4.

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (5)$$

Em que: N é o número de pontos medidos da variável $Z(x)$ envolvidos na estimativa de $z^*(x_0)$ e λ_i são os pesos associados a cada valor medido, $z(x_i)$. Se existe dependência espacial (constatada no semivariograma da variável), os pesos λ_i são variáveis de acordo com a distância entre o ponto a ser estimado $z^*(x_0)$ e os valores $z(x_i)$ envolvidos nas estimativas.

Para as variáveis que não apresentaram dependência espacial, foi utilizado o método do inverso do quadrado da distância para interpolação dos dados, com base na equação 5.

$$z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2} * z_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2} \right)} \quad (6)$$

Onde: z_p - variável interpolada; z_i - valor da variável da i -ésima localidade vizinha; d_i - distância euclidiana entre o i -ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado; e n – número de amostras. Os mapas e os semivariogramas foram elaborados, com o *software* R (R CORE TEAM, 2017).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Distribuição espacial de atributos físicos e carbono orgânico total do solo

6.1.1 Análise exploratória dos dados

Os valores dos parâmetros, em sua maioria, não oscilaram muito entre si, podendo ser constatado pela semelhança entre as medidas de posição (média e mediana) dos atributos, conferindo tendência à distribuição normal (Tabela 1). Segundo Góes (1980) a comparação dos valores da média e mediana indica se a distribuição apresenta normalidade.

Tabela 1 - Estatística descritiva (medidas de posição, de dispersão e de forma) das variáveis avaliadas na camada 0,00 a 0,10 m, ao longo da transecção espacial na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

Parâmetros	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	DP	CV%	Assimetria	Curtose
Ds (Mg m ⁻³)	1,40	1,43	0,84	1,74	0,19	13,91	-0,72	0,24
PT (%)	43,45	42,91	25,18	62,36	7,16	16,47	0,34	0,19
Ma (%)	11,64	10,49	2,02	29,48	6,18	53,03	0,85	0,21
Mi (%)	31,79	31,42	19,43	50,12	5,38	16,93	0,77	1,89
RP (MPa)	1,97	1,96	0,62	3,93	0,60	30,28	0,38	0,73
Ug (%)	10,87	10,17	7,15	19,18	2,70	24,90	0,92	0,34
Areia (g kg ⁻¹)	596,32	612,67	310,00	821,67	93,43	15,67	-0,94	1,31
Silte (g kg ⁻¹)	222,63	212,59	131,14	424,15	52,72	23,68	1,39	2,86
Argila (g kg ⁻¹)	181,05	161,35	47,19	519,19	80,51	44,47	2,20	6,53
COT (g kg ⁻¹)	20,11	19,90	8,20	33,50	5,16	25,64	0,26	0,10

DP: Desvio padrão; CV: Coeficiente de variação; Ds: Densidade do solo; PT: Porosidade total; Ma: Macroporosidade; Mi: Microporosidade; RP: Resistência à penetração; Ug: Umidade gravimétrica; COT: Carbono Orgânico Total.

O valor médio da densidade do solo (D_s) foi de $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$, sendo este, muito similar aos observados por outros pesquisadores na mesma bacia hidrográfica com variações de tipo solo e usos semelhantes (OLIVEIRA, 2015; SILVA, 2018).

A D_s oscilou entre 0,84 a $1,74 \text{ Mg m}^{-3}$, sendo o menor em área de mata nativa (RLd1), como frequentemente mencionado em pesquisas dessa natureza, e o maior em pastagem (PVad7), ocasionado pelo pisoteio animal, propiciando uma maior compactação na camada superficial (WENDLING et al., 2012 ; SILVA et al., 2016).

Os valores máximos e mínimos obtidos de porosidade total (PT) refletiram os resultados da sua relação inversa com a D_s , sendo encontrado o maior valor (62,36%) em mata nativa (RLd1) e o menor (25,18%) em solo sob pastagem (SXe2), corroborando com MOREIRA et al., 2014 ; FIDALSKI; ALVES, 2015. Segundo Alves et al. (2007) esse uso pode modificar o arranjo das partículas do solo, provocando diminuição no tamanho dos poros, especialmente daqueles maiores.

A macroporosidade (Ma) apresentou o valor médio de 11,64%, sendo este superior, ao preconizado na literatura científica, e não impeditivo para desenvolvimento vegetal. Valores de porosidade de aeração inferiores de 10% são, restritivos para o crescimento e produtividade da maioria das culturas (THOMASSON, 1978; MOREIRA, 2014).

Salienta-se que 50% das observações da Ma ao longo da transecção apresentaram valores inferiores a 10%, preocupante para desenvolvimento de atividades agropecuárias, em vistas, que a redução da Ma pode aumentar a resistência ao crescimento radicular, em condições de baixa umidade, reduzir a oxigenação, tornando a planta mais susceptível ao déficit hídrico e com limitada capacidade de absorver nutrientes (ROSOLEM et al., 1994). O menor valor encontra-se em solo sob pastagem (2,02%) na unidade pedológica SXe2 e o maior, em mata nativa (29,48%), na unidade pedológica RLd1.

A microporosidade (Mi) possui relação com outros atributos, a grande maioria das pesquisas converge para o fato de que, com o seu aumento, ocorre diminuição da porosidade total e macroporosidade. No entanto, o maior valor (50,12%) constatado foi em Mata Nativa (RLd1), razão pela qual, deve estar associado a elevada porosidade total (61,80%). Silva; Kay (1997) salientaram que a microporosidade do solo é influenciada pela granulometria e pelo teor de carbono orgânico.

O comportamento da resistência à penetração (RP) ao longo da transecção está coerente com os maiores valores de Ds e os menores de PT e Ma, haja vista que a RP integra os efeitos da densidade (TORMENA et al., 2002) e da porosidade total. O valor médio constatado de RP (1,97 MPa) esteve muito próximo ao crítico (2,0 MPa) para o crescimento das plantas (LAPEN et al., 2004; BLAINSKI et al., 2008). Na associação de solo SXe2 sob pastagem foi observado o maior valor de RP (3,93 MPa) e o menor em solo sob mata nativa (0,62 MPa) na unidade pedológica RLd1.

Embora haja evidências claras na literatura de que o impedimento radicular é reduzido ou eliminado quando o solo apresenta RP igual ou maior do que 2 MPa (REICHERT et al., 2003) estudos mencionam que cultivos em sistema de plantio direto (SPD), valores de 3,5 MPa não restringiram desenvolvimento radicular, porém influenciaram em alguns casos a morfologia das raízes (FILHO et al. 2001; BLAINSKI et al. 2012), sendo justificado em razão da presença de bioporos estáveis e contínuos, que atuam como rotas alternativas para o crescimento das raízes, assim como Ehlers et al. (1983) e Tormena et al. (2007) em SPD.

Na Figura 14 observa-se os valores de RP medidos e os estimados a partir do modelo não linear proposto por Busscher (1990) ao longo da transecção. O modelo apresentou uma capacidade preditiva satisfatória, visto que, os valores estimados, estão dentro de uma faixa de confiança obtida pelo valor de dois desvios padrão a mais (limite superior) e menos (limite inferior), sendo que os valores nessa área são um indicativo da qualidade da estimativa do modelo, corroborado pelo valor do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,56$) da regressão entre os valores observados e estimados pelo modelo (Figura 15).

Resultados comprovam que a resistência à penetração apresenta uma relação funcional, significativa, positiva e linear, podendo ser adequadamente estimada sob diferentes ecossistemas agrícolas. Conhecendo-se o valor de densidade e de umidade permite-se estimar a resistência a penetração ($RP = 2,02\theta v^{0,25}Ds^{1,47}$) e indicar valores restritivos ao desenvolvimento de plantas.

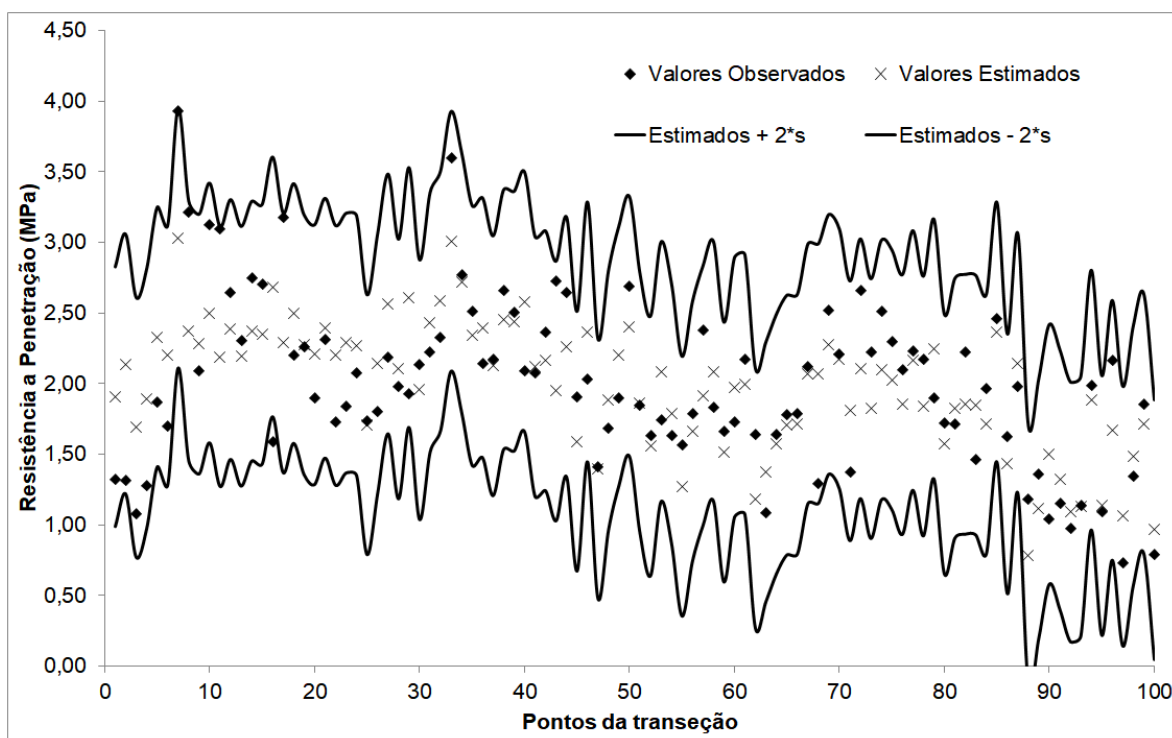


Figura 14 – Análise da resistência a penetração estimada pelo modelo Busscher (1990) e observada na transeção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

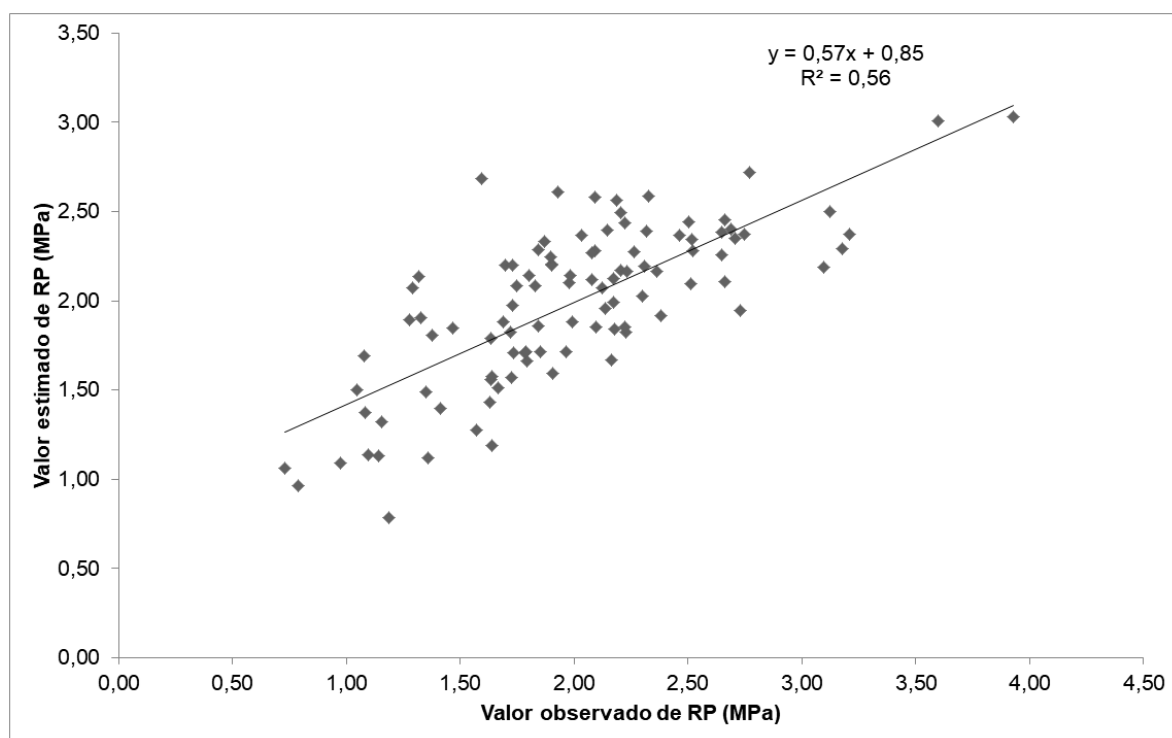


Figura 15 – Regressão linear entre os valores de resistência a penetração estimados pelo modelo Busscher (1990) e os observados na transeção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

O COT é um indicador responsivo ao tipo de uso, manejo e sistema radicular, bem como o histórico de uso. Convergindo nessa concepção, o solo sob mata nativa (RLd1) apresentou o maior valor referente ao teor de COT ($33,5 \text{ g kg}^{-1}$) devido ser um sistema com menor perturbação física, química e biológica do solo, propiciando uma ciclagem de nutrientes mais eficiente, evitando uma menor perda desse elemento por oxidação.

O menor COT de $8,2 \text{ g kg}^{-1}$, se encontrou na entrelinha de cultivo de soja (SPC), em decorrência do excesso de revolvimento, proporcionando a maior perda e mineralização (SILVA, 2018), evidenciando indícios de redução da qualidade do solo. Segundo Feddema (1998) as perdas no teor de COT estão associadas à degradação física refletindo no declínio da integridade da estrutura do solo promovendo alterações em propriedades que controlam processos fundamentais relacionados com a dinâmica de água, ar e calor.

O valor médio do teor de COT do solo ao longo da transecção foi de $19,9 \text{ g kg}^{-1}$ (Tabela 1), considerado alto de acordo com a classificação do Manual de calagem e adubação do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (NRS/SBCS, 2016) e, muito similar ao resultado de Oliveira (2015) na região.

Wiesmeier et al. 2019 consideram que o conteúdo de carbono não é apenas decisivo para a regulação do clima no planeta, mas afeta todas as outras funções. Sendo considerado um pré-requisito para avaliar o impacto das mudanças na gestão da terra na funcionalidade do solo, como é pretendido pela iniciativa de financiamento do projeto do Ministério Federal de Educação e Pesquisa desenvolvido na Alemanha intitulado de “*BonaRes*”⁷.

Percebe-se uma variação de classes texturais, devido às diferentes classes de solos na sub-bacia, ao longo da transecção, com predomínio da classe franco-arenosa (Figura 16).

⁷ “**BonaRes**” é a abreviação de “Solo como um recurso sustentável para a bioeconomia”. Nesta iniciativa de financiamento do Ministério Federal Alemão de Educação e Pesquisa, têm como foco o uso sustentável dos solos como um recurso limitado. O objetivo final da BonaRes é ampliar o entendimento científico dos ecossistemas do solo e melhorar a produtividade e outras funções do solo, desenvolvendo novas estratégias para o uso e manejo sustentável. Disponível: www.bonares.de

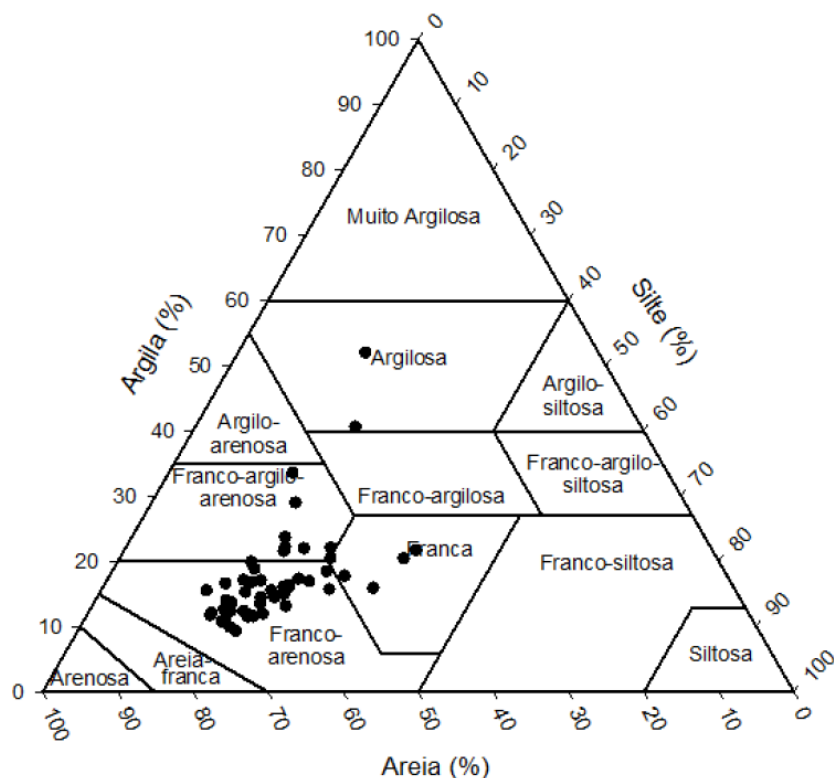


Figura 16 – Classificação textural de solos (pontos georreferenciados) ao longo da transecção sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS. Elaborado por Thaís Palumbo Silva.

Nota-se, na Tabela 1, que o CV da distribuição dos dados ao longo da transecção variou de 13,91% (densidade do solo) a 53,03% (macroporosidade) e que, segundo a classificação proposta por Wilding; Dress (1983) pode ser considerado como baixo ($CV < 15\%$) para os dados de Ds (13,91%); médio ($15\% \leq CV < 35\%$) para os dados de PT (16,47%), Mi (16,93%), RP (30,28%), Ug (24,90%), areia (15,67%), silte (23,68%) e COT (25,64%); alto ($CV \geq 35\%$) macroporosidade (53,03%) e o teor de argila (44,47%). Indica a variação dos dados em relação à média, coeficientes de variação baixos representam uma distribuição homogênea.

A assimetria e curtose indicam o formato da distribuição de probabilidades de elementos da população amostrados em torno da média. Como pode ser observada na Tabela 1, a assimetria da densidade e da areia foi negativa (coeficiente de assimetria < 0), com média deslocada para o lado direito do gráfico (Figura 17) e as demais variáveis, apresentaram assimetrias positivas (coeficiente de assimetria > 0). Em relação ao grau de achatamento das distribuições foi observado que todas as variáveis são consideradas como leptocúrtica (coeficiente de curtose > 0), por

possuir a curva da função de distribuição com um pico mais alto que a distribuição normal.

As Figuras 17, 18, 19 e 20 apresentam os gráficos do tipo boxplot e histogramas dos atributos densidade, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, resistência a penetração, umidade gravimétrica, areia, silte, argila e carbono orgânico total do solo nos 101 pontos demarcados na transecção na sub-bacia Micaela.

O gráfico tipo boxplot é uma ferramenta estatística utilizada para a detecção de “*outliers*” (REICHARDT; TIMM 2012). No entanto, é sugestionado em estudos de variabilidade espacial, a não remoção de “*outliers*”, uma vez que, pode se tratar do comportamento real da variável no campo, desta forma, não mascarando os resultados quando da aplicação de modelos estatísticos. Já os histogramas são uma ferramenta de análise e representação de dados quantitativos como a simetria ou assimetria do conjunto de dados.

Analizando o boxplot, observa-se que a microporosidade, silte e argila apresentaram dados “*outliers*”. Todavia, esses dados não foram considerados como discrepantes, não recebendo tratamento, pois além de se tratar de um estudo sobre a variabilidade espacial, o qual os dados discrepantes podem descrever o real comportamento daquele atributo, existe o componente da escala utilizada (112 m de espaçamento) para a coleta das amostras.

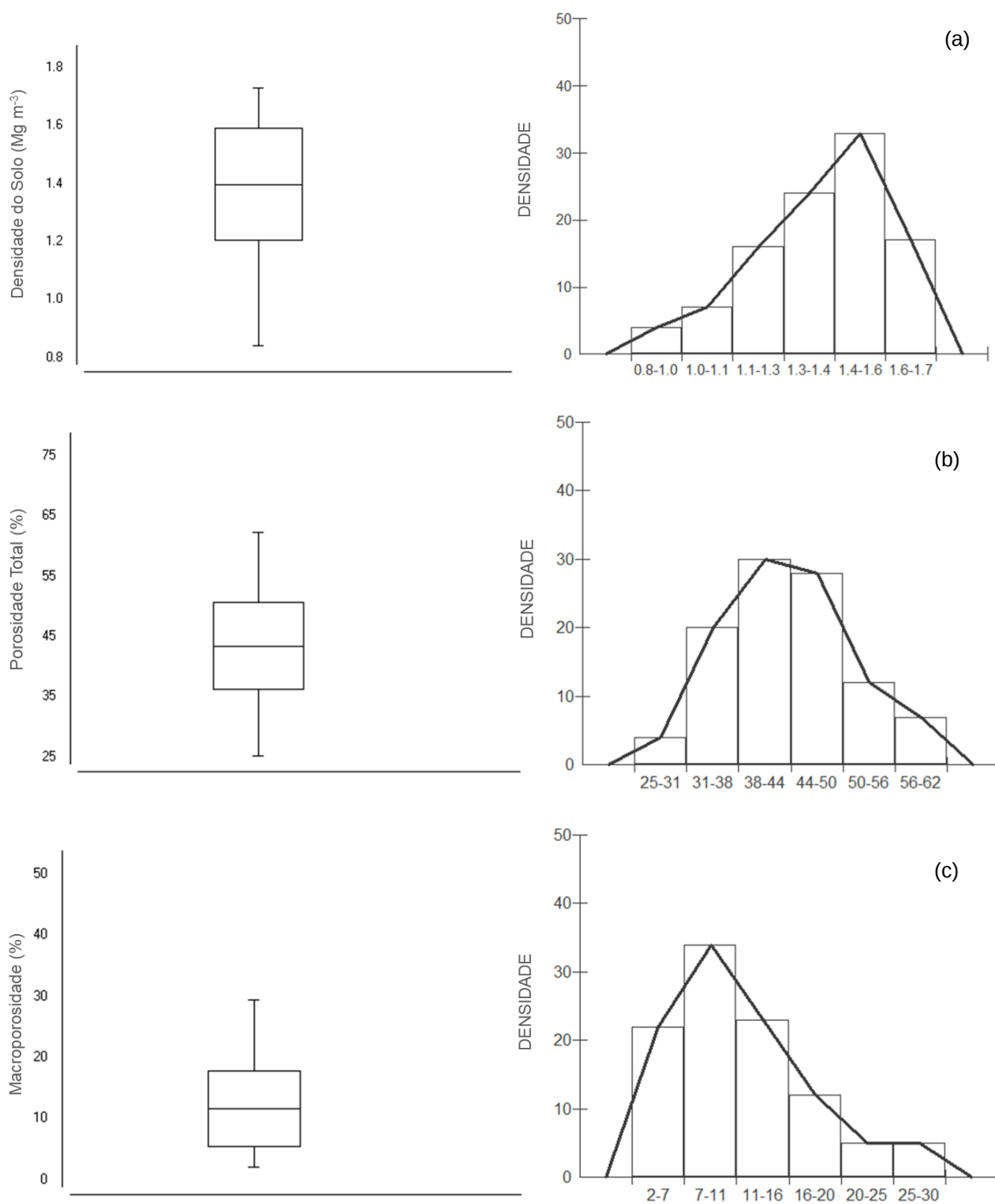


Figura 17 – Gráfico do tipo boxplot e histograma de densidade para os atributos (a) densidade do solo; (b) porosidade total e (c) macroporosidade respectivamente, na transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

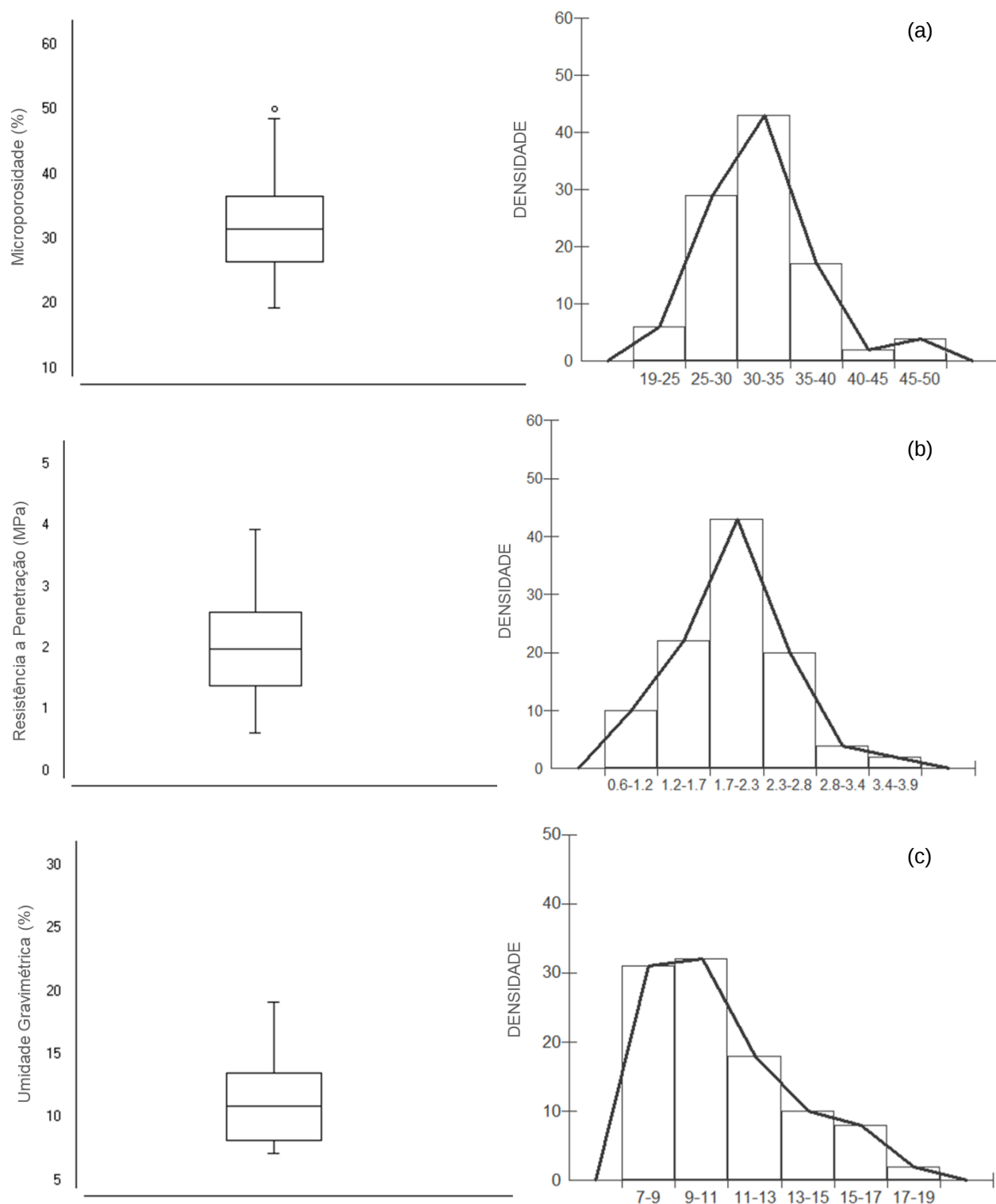


Figura 18 – Gráfico do tipo boxplot e histograma de densidade para os atributos (a) microporosidade; (b) resistência à penetração e (c) umidade respectivamente, na transecção sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

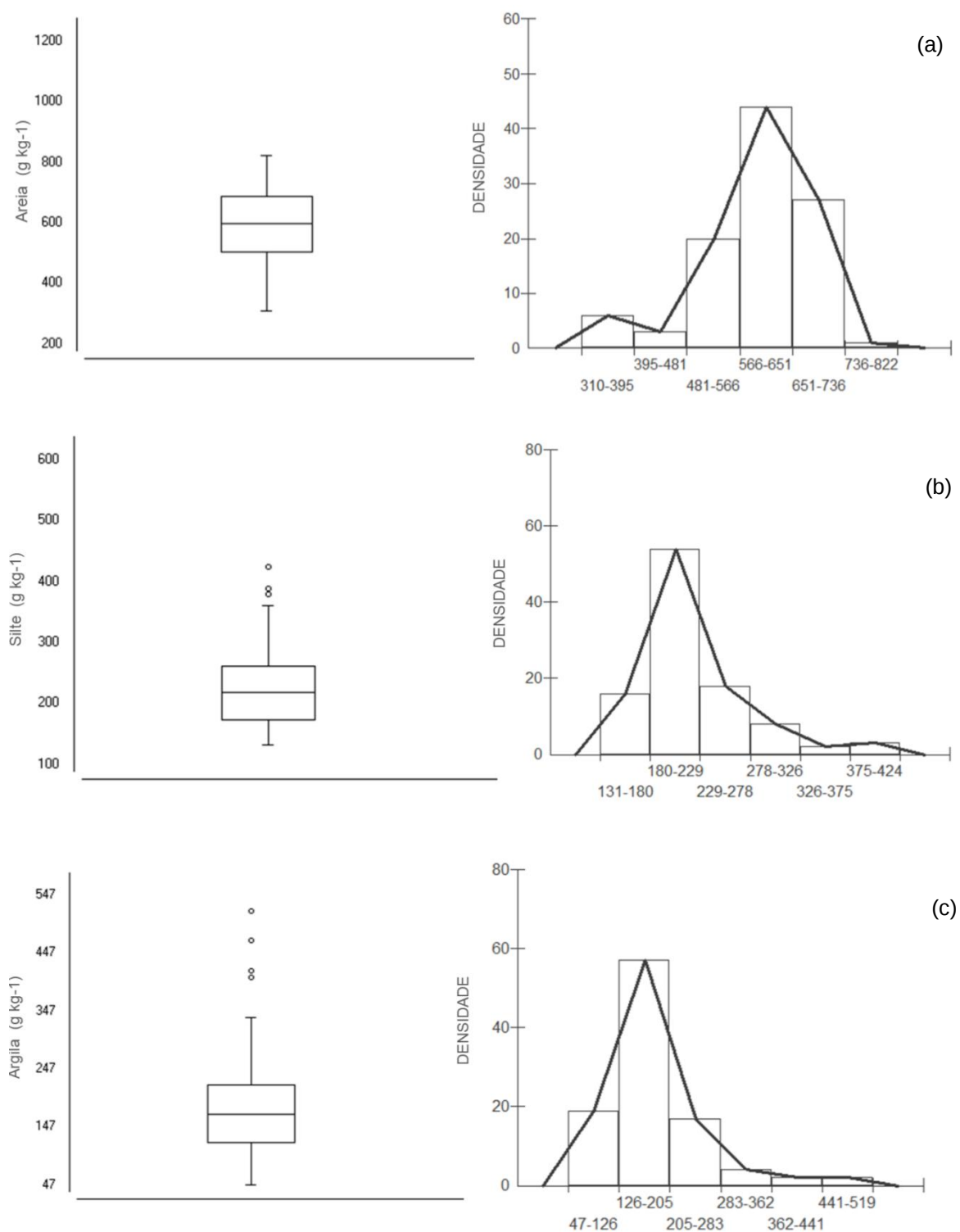


Figura 19 – Gráfico do tipo boxplot e histograma de densidade para os atributos (a) areia; (b) silte e (c) argila respectivamente na transecção sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

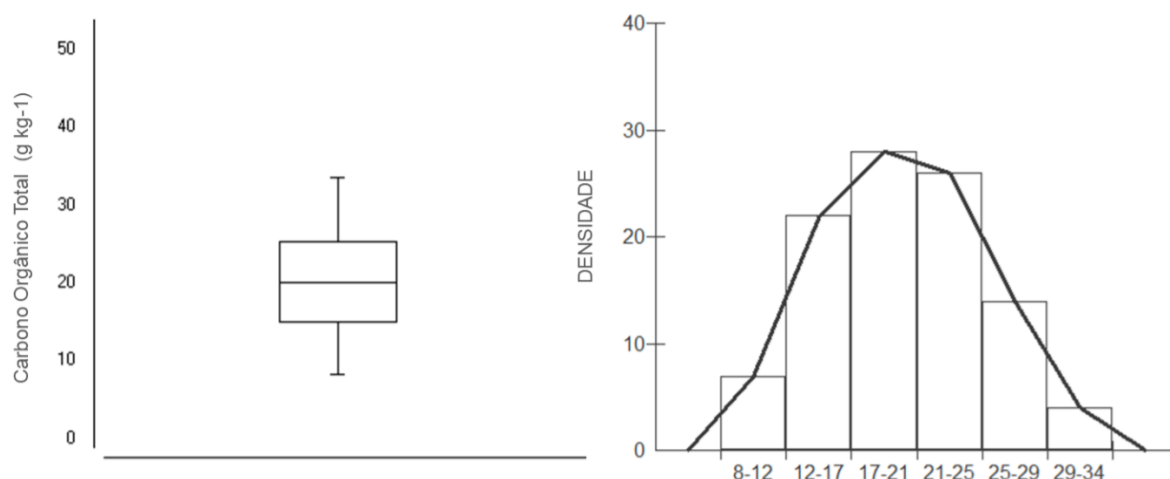


Figura 20 – Gráfico do tipo boxplot e histograma de densidade para o atributo o carbono orgânico total respectivamente na transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

Posteriormente, o conjunto de dados foi submetido ao teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov para verificar a distribuição das séries espaciais em relação à distribuição normal (Tabela 2). Segundo Vereecken; Herbst (2004), esse teste é recomendado para conjunto de dados superior a 50 observações.

Tabela 2 - Teste não paramétrico de Kolmogorov – Smirnov, ao nível de 5% das variáveis, na camada de 0,00 a 0,10 m, ao longo da transecção espacial na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

Parâmetros	P	Ks
Ds (Mg m^{-3})	0,013	0,101
PT (%)	0,222	0,072
Ma (%)	0,003	0,114
Mi (%)	0,010	0,104
RP (Mpa)	0,253	0,070
Ug (%)	0,001	0,121
Areia (g kg^{-1})	0,004	0,110
Silte (g kg^{-1})	2,42E-06	0,156
Argila (g kg^{-1})	1,16E-06	0,160
COT (g kg^{-1})	0,168	0,076

P: p valor a 5% de significância. Ks: (valor crítico: 0,0882 para $n=101$); Ds: Densidade do solo; Total do solo; PT: Porosidade Total do solo; Ma: Macroporosidade do solo; Mi: Microporosidade do solo; RP: Resistência a penetração; Ug: Umidade gravimétrica; COT: Carbono Orgânico Total.

A Ds, Ma, Mi, Ug, areia silte e argila apresentaram distribuição não normal pelo valor p sendo inferior ao nível de probabilidade de 5%, nesse caso, portanto,

rejeita-se H_0 (hipótese nula), concluindo-se que a distribuição não segue a distribuição normal. Os demais atributos, apresentaram valores de P significativo a 5%, ou seja, distribuição simétrica com tendência a normalidade, não rejeitando a hipótese nula (H_0).

Além da estatística descritiva, dos gráficos do boxplot, histogramas, teste não - paramétrico de Kolmogorov - Smirnov, procedeu-se a análise da série de dados para a verificação da distribuição espacial, ponto a ponto, de cada uma das variáveis avaliadas ao longo da transecção. Ao analisar as Figuras 21 e 22, observa-se que as séries de dados possuem uma grande variação ao longo da transecção, devido às diferentes classes e uso do solo.

A distribuição dos atributos densidade (Ds) e resistência à penetração (RP) apresentam uma tendência de redução dos valores a partir do ponto 80 até final da transecção. Em contrapartida, nesse mesmo intervalo percebe-se uma tendência de aumento dos valores dos atributos macroporosidade e carbono orgânico total, corroborando com Andrade et al. (2009), que observou que o COT contribui com a melhor agregação e consequentemente, resultando em mais macroporos, que por sua vez, elevam-se os pontos de fraqueza e logo diminuem a RP do solo. No intervalo mencionado ocorre a maior área de Mata Nativa contínua, dentro do segmento analisado.

Cabe salientar que 47,47% das observações referente a RP encontra-se acima do valor crítico (2 MPa) para desenvolvimento vegetal, situação preocupante do ponto de vista da manutenção e conservação do solo. Tavares Filho et al. (2001) afirmam que, se houverem condições químicas e umidade favorável, e se a porosidade do solo permitir que ocorra difusão de oxigênio, as raízes podem sofrer deformações morfológicas e crescer através de pontos de menor resistência, mesmo em solo com valores elevados de resistência mecânica à penetração.

De maneira geral, as oscilações dos atributos do solo estão associadas às características de uso e as classes de solo. Em áreas naturais (mata nativa), por exemplo, o solo encontra-se em processo conservativos (ordenativos), ou seja, a energia é conservada, isto é, ela não é dissipada para o meio externo, em decorrência desta razão, é possível observar os maiores valores de COT, PT, Ma nessas áreas. Já em áreas utilizadas para atividades agrícolas, o solo encontra-se em processos dissipativos que necessitam constante aporte de energia livre, a qual é utilizada para o seu estabelecimento e manutenção, resultando em alterações nos

atributos mencionados e, na maioria das vezes, causando impacto negativo (SILVA et al., 2007).

A avaliação das propriedades do solo que estimam a sua qualidade assume importante papel no monitoramento e conservação. Compreender alterações nos atributos do solo em razão da conversão da vegetação nativa em áreas cultivadas, bem como, sua variabilidade espacial, pode contribuir para gestão mais eficiente desse recurso natural.

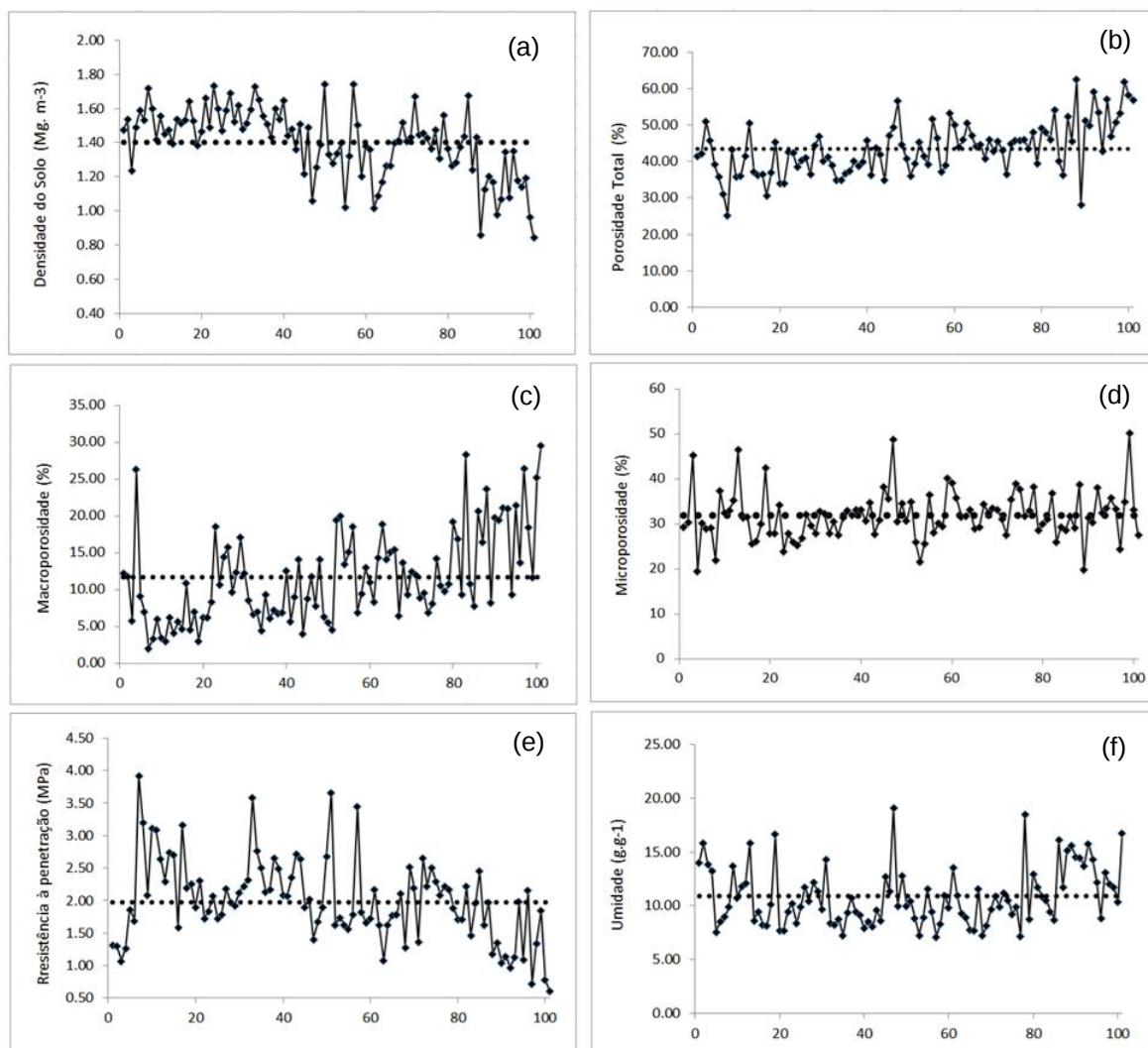


Figura 21 – Distribuição espacial da densidade (a), da porosidade total (b), microporosidade (c), resistência à penetração (d) e umidade dos solos (f), e suas respectivas médias (linha pontilhada) na transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

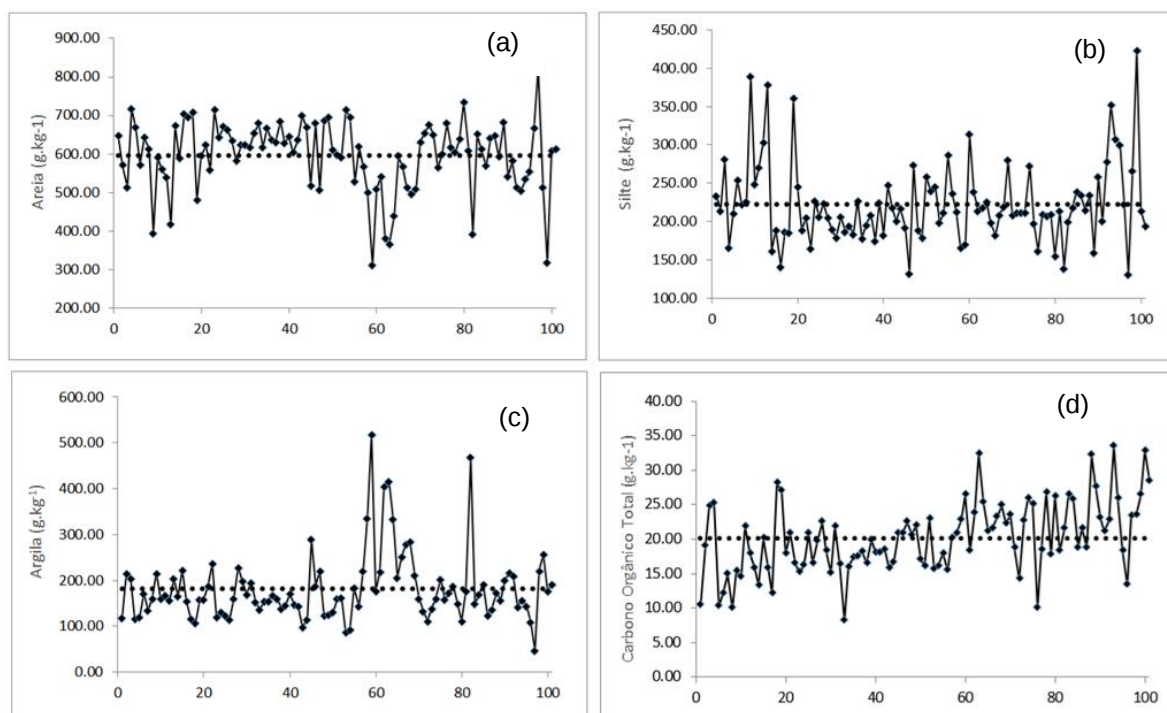


Figura 22 – Distribuição espacial da areia (a), do silte (b), da argila (c), do carbono orgânico total dos solos (d) e suas respectivas médias (linha pontilhada) na transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

6.1.2 Análise de dependência espacial

Com a finalidade de observar os efeitos dos testes descritos em análise geoestatística, foram produzidos semivariogramas para cada uma das variáveis. As Figuras 23(b), 25(a), 27(b) apresentam os semivariogramas dos atributos PT, RP, e COT, respectivamente utilizando o estimador de Matheron, (1962) atendendo à pressuposição de distribuição normal dos dados e a ausência de *outliers*.

As variáveis Ds, PT, RP, Ug, areia, argila e COT apresentaram dependência espacial, visto que, ao aumentar a distância, os valores dos pontos tornam-se mais diferentes e, conseqüentemente, a variância aumenta conforme pode ser observado nas Figuras 23(a), 23(b), 25(a), 25(b), 26 (a), 27(a) e 27(b). Segundo Landin; Yamamoto (2013), muitas vezes a variância se estabiliza ao em torno da variância máxima, a partir de certa distância. No entanto, a casos que a variância continua aumentando indefinidamente, configuram semivariogramas sem patamar.

Oliveira (2018), na mesma sub-bacia inferiu que macroporosidade, a porosidade total, a areia, a argila e a matéria orgânica apresentaram dependência espacial na transecção.

As Figuras 24(a), 24(b) e 26(b) demonstram que as variáveis Ma, Mi e silte não apresentaram dependência espacial, visto que, os valores da semivariância se mantiveram praticamente constantes com o incremento da distância, não atendendo à pressuposição da semivariância que é uma medida de dissimilaridade e, conforme há o incremento da distância entre os pontos vizinhos, deveria ocorrer o aumento da semivariância entre eles até atingir um patamar onde a semivariância torna-se constante. Segundo McBratney; Webster (1986) havendo a independência espacial das observações, o modelo do semivariograma não pode ser ajustado. O efeito pepita indica uma variabilidade não explicada, considerando a distância de amostragem utilizada.

Salienta-se ainda, em tal situação, de efeito pepita puro não foi encontrada a estrutura de variação, sendo o raio de ação menor que a distância amostrada. Neste caso, pontos localizados em uma área de raio maior do que o alcance é independente, apresentando distribuição espacial aleatória e menos homogênea (TAKEDA, 2000). Segundo Silva et al. (1989) para estas amostras, a estatística clássica pode ser aplicada sem restrição.

Guimarães et al. (2016) verificando a dependência espacial, por meio de semivariogramas de atributos físicos em Argissolo sob pastagem constatou resultado semelhante para Ma e Mi. Tuchtenhagen (2018) verificou efeito pepita puro para Mi em uma sub-bacia hidrográfica, com diferentes classes de solo (Neossolo, Argissolo, Planossolo, Gleissolo) e usos distintos.

O cálculo da semivariância das variáveis Ds, Ma, Mi, Ug, areia, silte e argila foi realizado utilizando o estimador proposto por Cressie; Hawkins (1980), por ser mais robusto e apresentar menor influência de *outlier* na estimativa da semivariância em comparação com o estimador clássico (MATHERON, 1962), visto que essas variáveis não apresentaram distribuição de probabilidade dos dados normal. Lark (2000) ressalta que métodos robustos têm sido desenvolvidos para uma ampla gama de problemas na estatística, todavia não devem ser empregados sem uma reflexão prévia.

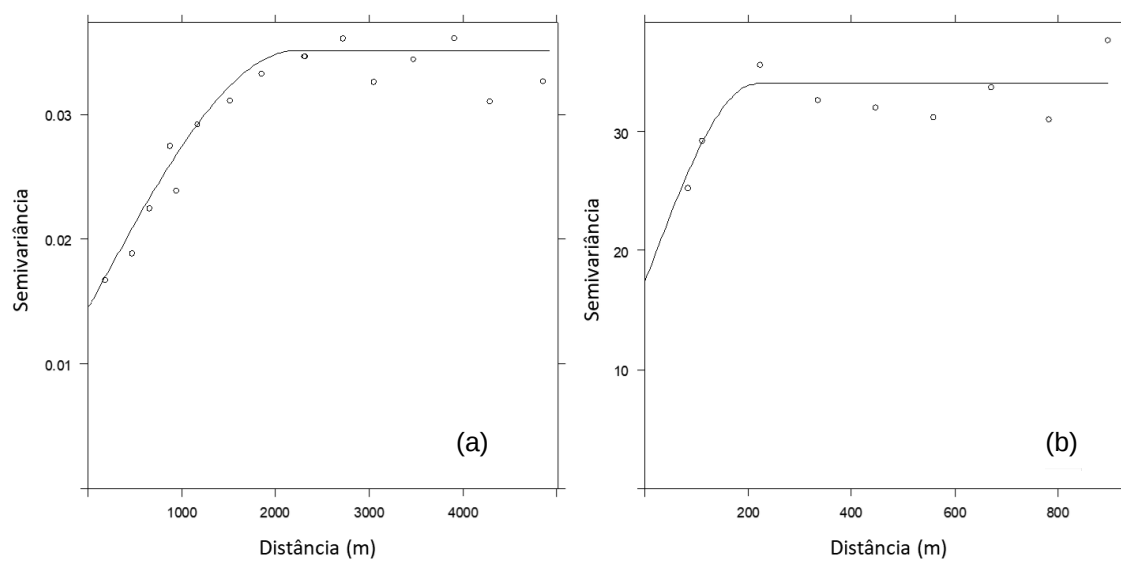


Figura 23 – Semivariogramas da densidade do solo (a) e porosidade total (b) da transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

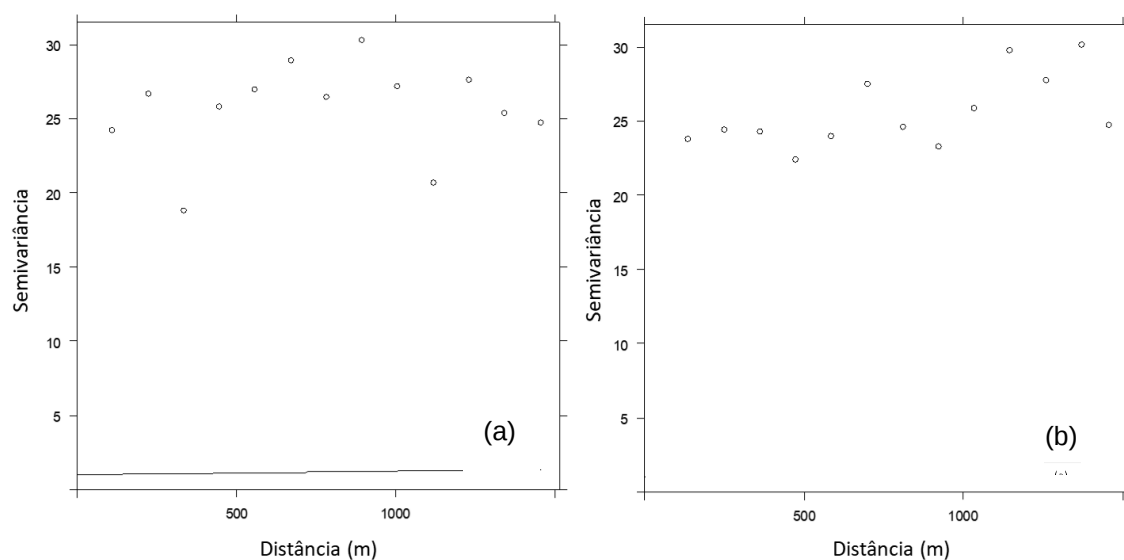


Figura 24 – Semivariogramas da macroporosidade (a) e microporosidade (b) da transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

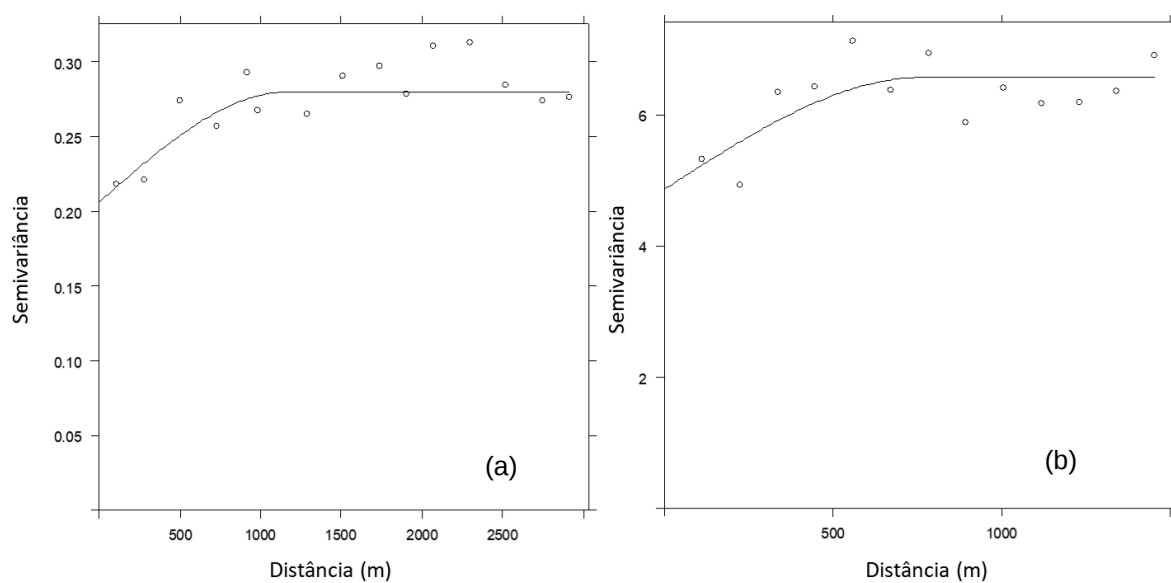


Figura 25 – Semivariogramas da resistência à penetração (a) e U_g (b) da transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

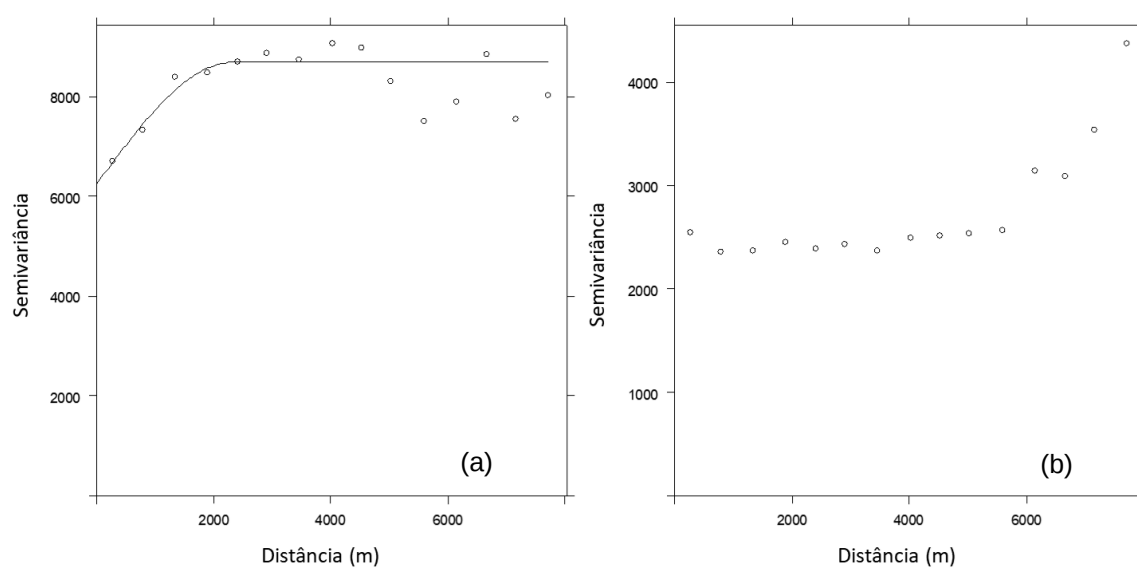


Figura 26 – Semivariogramas da areia (a) e silte (b) da transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

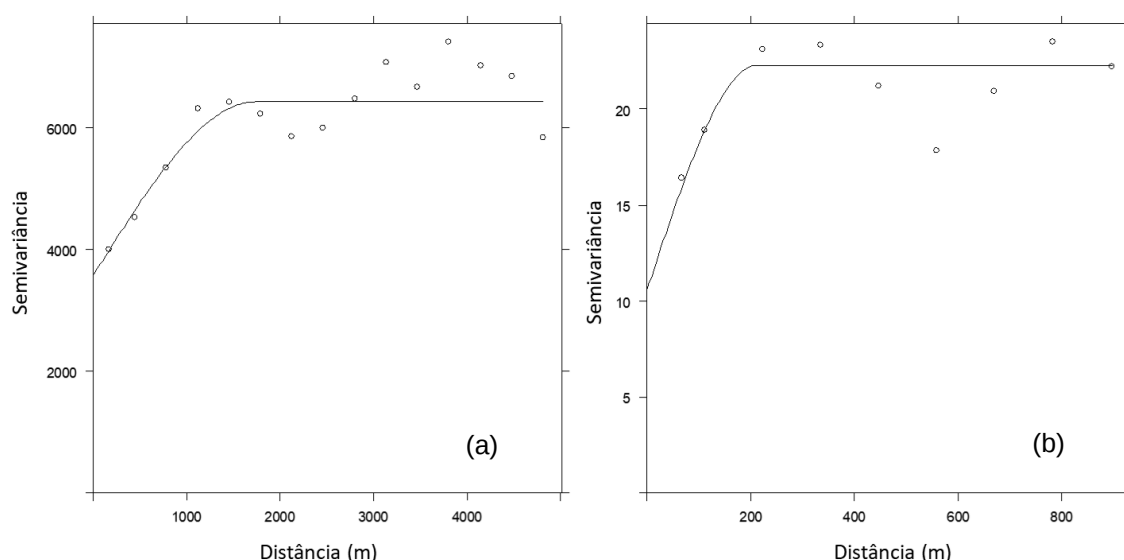


Figura 27 – Semivariogramas da argila (a) e COT (b) da transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

A análise do grau de dependência espacial das variáveis baseou-se na classificação de Cambardella et al. (1994), sendo considerados: dependência espacial forte os semivariogramas com efeito pepita < 25% do patamar, de dependência espacial moderada quando o efeito pepita está entre 25 e 75% e de dependência espacial fraca quando o efeito pepita é >75%.

Os resultados dos parâmetros efeito pepita e patamar na Tabela 3 apresentaram grau de dependência espacial classificado como moderado, devido ao efeito pepita ter correspondido a 41,18 %, 51,22 %, 73,57 %, 73,98 %, 72,02%, 55,46%, e 47,31% do patamar. Resultado similar foi obtido por Tuchtenhagem (2018) para atributos Ds, RP, PT.

Os modelos dos semivariogramas foram determinados para as variáveis que apresentaram dependência espacial, ajustando-se o modelo teórico para obtenção dos parâmetros. Os critérios de seleção dos modelos levaram em consideração o grau de dependência espacial e a variância da respectiva variável, a qual deve ter concordância com o valor do patamar do semivariograma teórico ajustado, além do melhor ajuste do coeficiente de correlação obtido pela análise de validação cruzada (VC).

Todas as variáveis tiveram seus semivariogramas melhores ajustados pelo modelo do tipo esférico corroborando com as afirmações de McBratney; Webster (1986), e Cambardella et al. (1994).

O alcance representa a distância em que os pontos amostrais estão correlacionados entre si (YAMAMOTO; LANDIM, 2013), importante no planejamento experimental e amostral (MCBRATNEY; WEBSTER, 1983). Um alcance mínimo de 214,13 m e máximo de 2319,49 m, indicam amplitude de correlação espacial entre as observações. As diferenças de alcance podem ser atribuídas a variabilidade e continuidade espacial (WEBSTER; OLIVER, 2007).

Tuchtenhagem (2018) em sua pesquisa na sub-bacia Santa Rita, lindeira a Micaela, constatou o alcance de 2.800 m para RP, 2.500 para Ds, 1.200 m para PT e 440 m para COT. Dutra (2019) observou um alcance de 1428 m para PT também na sub-bacia Santa Rita, Soares (2018) em uma sub-bacia da bacia hidrográfica do arroio Pelotas, verificou alcance de 191,84 m de COT e 162,53 m para PT, corroborando, similarmente com os resultados encontrados nessa pesquisa.

Viera (2000) salienta que o alcance indica a linha divisória entre a aplicação da estatística clássica (pode ser usada sem restrições para distâncias maiores) ou da Geoestatística, para distâncias menores que o alcance em que as amostras são correlacionadas e podem ser utilizadas para interpolação dos locais não amostrados. Mulla; McBratney (2002) ressaltam que o alcance é o parâmetro mais importante dos semivariogramas e ainda recomendam a amostragem seja estabelecida $1/4$ ou $1/2$ do alcance.

A maior parte dos estudos quantificam a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em parcelas experimentais ou áreas agrícolas em escala de propriedade rural (REZA et al., 2015), informações em escala de bacia hidrográfica com amostras espacialmente distribuídas em transeção ainda são escassas na literatura científica.

A geoestatística permite identificar a existência ou não de dependência espacial entre as observações, servindo de subsídio para orientação de futuras amostragens e modelagens, possibilitando, a estimativa de atributos de locais não amostrados, facilitando a gestão dos recursos naturais, especialmente em bacias hidrográficas.

Tabela 3 - Modelo teórico do semivariograma para atributos do solo avaliados, na camada de 0,00 a 0,10 m, ao longo da transecção espacial da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

Parâmetros	Estimador da semivariância	Modelo	Contribuição	Alcance	Patamar	Efeito Pepita	VC
			C	(a)	(C0 + C)	C0	
Ds (Mg m ⁻³)	CH	Esférico	0,02	2140,03	0,03	0,01	0,51
PT (%)	M	Esférico	16,60	215,64	34,02	17,42	0,33
Ma (%)	CH	EPP	-	-	-	-	
Mi (%)	CH	EPP	-	-	-	-	
RP (Mpa)	M	Esférico	0,07	1165,89	0,28	0,21	0,24
Ug (%)	CH	Esférico	1710,00	772,54	6572,00	4862,00	0,13
Areia (g kg ⁻¹)	CH	Esférico	2427,70	2319,49	8676,10	6248,40	0,23
Silte (g kg ⁻¹)	CH	EPP	-	-	-	-	
Argila (g kg ⁻¹)	CH	Esférico	2862,95	1741,63	6434,26	3568,32	0,13
COT (g kg ⁻¹)	M	Esférico	11,75	214,13	22,30	10,55	0,14

Ds: Densidade do solo; PT: Porosidade Total do solo; Ma: Macroporosidade do solo; Mi: Microporosidade do solo; Resistência à penetração; Ug: Umidade gravimétrica COT: Carbono Orgânico Total; M: Matheron (1962); CH: Cressie e Hawkins (1980); EPP: efeito pepita puro; VC: coeficiente de correlação obtido pela análise de validação cruzada.

6.2 Distribuição espacial de atributos radiculares

6.2.1 Análise exploratória dos dados

Nota-se o predomínio da textura franco-arenosa nas camadas superficiais e uma leve variação na camada subsuperficial nas associações de solos (Tabela 4).

Tabela 4 - Frações granulométricas e textura das associações de solos (SXe2, PVad7 e RLd1) nas camadas de 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m sob diferentes usos na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

Classe de solo	Camada (m)	Areia	Silte	Argila	Textura
		g.kg ¹			
SXe2	0,00 - 0,10	617,25	227,84	154,91	Franco-arenosa
	0,10 - 0,20	588,29	233,64	178,07	Franco-arenosa
PVad7	0,00 - 0,10	629,78	215,16	155,06	Franco-arenosa
	0,10 - 0,20	571,57	191,74	236,69	Franco-argilo-arenosa
RLd1	0,00 - 0,10	614,61	216,68	168,71	Franco-arenosa
	0,10 - 0,20	615,19	229,21	155,60	Franco-arenosa

SXe2: associações de Planossolo Háptico Eutrófico e Argissolo Acinzentado Eutrófico; PVad7: associações de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico; Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico; RLd1: associações de Neossolo Litólico distrófico e Argissolo Amarelo Distrófico

Nota-se que os valores médios de Ds variaram de 0,90 a 1,74 Mg m⁻³ na camada superficial e 1,32 a 1,71 Mg m⁻³ na camada subsuperficial, sendo os

menores encontrados sob mata nativa e os maiores observado em área de pastagem independente da camada e da associação de solo (Tabela 5), corroborando com estudos de Silva (2017), e em sub-bacias próximas com usos e classes de solo semelhantes (OLIVEIRA, 2015, TUCHTENHAGEM, 2018).

Tabela 5 - Estatística descritiva, medida de posição das variáveis físicas do solo, carbono orgânico total e das frações granulométricas do carbono orgânico, nas camadas de 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m, avaliadas nas diferentes classes de solo e usos na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

Solo	Usos	Camada (m)	Ds (Mg m ⁻³)	PT (%)	Ma (%)	Mi (%)	RP Mpa	COT (g kg ⁻¹)	COp (g kg ⁻¹)	COam (g kg ⁻¹)
SXe2	PA	0,00 - 0,10	1,62	34,01	4,49	29,52	3,07	21,65	3,5	18,15
		0,10 - 0,20	1,71	34,76	7,25	27,50	3,15	7,71	0,6	7,11
	VE	0,00 - 0,10	1,53	36,51	6,34	30,17	1,93	17,70	2,54	15,16
		0,10 - 0,20	1,69	32,18	6,72	25,46	2,22	10,00	1,64	8,36
	MN	0,00 - 0,10	1,35	46,23	11,97	34,26	1,20	24,80	4,36	20,44
		0,10 - 0,20	1,36	45,21	10,85	34,36	1,21	19,55	3,84	15,71
	PA	0,00 - 0,10	1,74	34,56	6,42	27,94	3,56	17,35	2,06	15,29
		0,10 - 0,20	1,51	40,45	11,43	29,02	1,98	8,18	1,02	7,16
	VE	0,00 - 0,10	1,37	42,40	7,31	35,09	2,03	20,15	2,98	17,17
		0,10 - 0,20	1,51	38,56	8,32	30,24	2,21	9,49	1,32	8,17
PVad7	MN	0,00 - 0,10	1,35	46,78	16,42	30,36	1,65	21,25	4,18	17,07
		0,10 - 0,20	1,38	46,37	15,13	31,24	1,71	16,36	3,00	13,36
	PA	0,00 - 0,10	1,26	46,21	14,33	31,88	1,57	23,5	3,42	20,08
		0,10 - 0,20	1,54	39,40	12,28	27,12	2,36	15,35	2,08	13,27
	VE	0,00 - 0,10	1,24	37,41	10,92	26,49	1,76	20,50	3,42	17,08
		0,10 - 0,20	1,51	41,12	10,25	30,87	2,27	15,93	1,86	14,07
	MN	0,00 - 0,10	0,90	57,57	27,34	30,23	0,71	30,65	6,12	24,53
		0,10 - 0,20	1,32	53,65	19,41	34,24	1,34	18,11	3,16	14,95
	PA	0,00 - 0,10	1,26	46,21	14,33	31,88	1,57	23,5	3,42	20,08
		0,10 - 0,20	1,54	39,40	12,28	27,12	2,36	15,35	2,08	13,27
RLd1	VE	0,00 - 0,10	1,24	37,41	10,92	26,49	1,76	20,50	3,42	17,08
		0,10 - 0,20	1,51	41,12	10,25	30,87	2,27	15,93	1,86	14,07
	MN	0,00 - 0,10	0,90	57,57	27,34	30,23	0,71	30,65	6,12	24,53
		0,10 - 0,20	1,32	53,65	19,41	34,24	1,34	18,11	3,16	14,95
	PA	0,00 - 0,10	1,26	46,21	14,33	31,88	1,57	23,5	3,42	20,08
		0,10 - 0,20	1,54	39,40	12,28	27,12	2,36	15,35	2,08	13,27
	VE	0,00 - 0,10	1,24	37,41	10,92	26,49	1,76	20,50	3,42	17,08
		0,10 - 0,20	1,51	41,12	10,25	30,87	2,27	15,93	1,86	14,07
	MN	0,00 - 0,10	0,90	57,57	27,34	30,23	0,71	30,65	6,12	24,53
		0,10 - 0,20	1,32	53,65	19,41	34,24	1,34	18,11	3,16	14,95

SXe2: Associações de Planossolo Háplico Eutrófico e Argissolo Acinzentado Eutrófico; PVad7: Associações de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico; Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico; RLd1: Associações de Neossolo Litólico distrófico e Argissolo Amarelo Distrófico; PA: pastagem; VE: vegetação espontânea; MN: Mata Nativa; Ca: camada de solo; Ds: Densidade do solo; PT: Porosidade Total do solo; Ma: Macroporosidade do solo; Mi: Microporosidade do solo; Resistência à penetração; COT: Carbono orgânico total; COp: Carbono orgânico particulado; COam: Carbono orgânico associado a fração mineral.

Em geral, os maiores valores médios de PT, Ma, COT, COp e COam foram constatados em área sob mata nativa em ambas as camadas, similarmente aos valores mínimos de RP observados (Tabela 5), em razão da manutenção constante de cobertura promovendo o equilíbrio da fauna do solo, aporte de matéria orgânica, menores perdas de solo e nutrientes pela erosão e aumento da capacidade de retenção de água no solo (CAMPANHA et al., 2009).

O menor valor de Ma e o maior de RP foram obtidos, em área sob pastagem, nas associações de solo mais representativas da sub-bacia (SXe2 e PAVd). Ratificando que a pecuária pode causar a compactação do solo principalmente nas camadas menos profundas, provocadas pelo pastejo e pisoteio excessivo dos animais (REICHERT et al., 2010; PAIVA 2016). No entanto na associação de solo RLd1, no uso pastagem, foi observado maiores de valores de Ma em relação as demais associações de solo com o mesmo uso, possivelmente em razão da ocupação para o uso agrário, nessa área, ser mais recente e consequentemente com menor perturbação no solo.

Os teores de COT tenderam a ser elevados na camada de 0,0 a 0,10 m em relação à camada de 0,10 a 0,20 m, independente da classe e do sistema uso de solo. Esse comportamento demonstra a maior influência no teor de COT dos resíduos vegetais deixados em superfície pelas diferentes coberturas vegetais, corroborando com os resultados do COp. Conceição et al. (2005) salientam que carbono orgânico lábil associada a fração areia desempenha importante função na ciclagem de nutrientes do solo.

Analizando os teores de COp e COam sob diferentes sistemas de uso, nota-se a maior concentração em áreas de MN independe da camada e da classe de solo em decorrência do contínuo e robusto aporte de resíduos vegetais em superfície. Em relação PA observa-se uma concentra-se percentual de COp menor em relação aos demais usos. Segundo Souza et al. (2009) em pastagem pastejada a distribuição do material lábil é alterada, fazendo com que a atividade microbiana também seja diferenciada, de tal forma que, nas pastagens sem pastejo, os resíduos vegetais são mais bem distribuídos e menos decompostos pelos microrganismos, em relação aos das áreas pastejadas, o que favorece o acúmulo de carbono no solo.

A fração Coam apresentou teor superior em comparação à COp em todos os sistemas de usos, camadas e classes de solo corroborando a hipótese de que a proteção de minerais de argila e silte dificulta a decomposição da MOS. Segundo Christensen (1996) esse mecanismo de interação do Coam com as partículas minerais (argila e silte), propícia a formação de complexos organominerais, protegida pelo mecanismo de proteção coloidal.

Os resultados obtidos a partir da análise das imagens 2D para os atributos radiculares apresentaram valores dentro do intervalo conhecido cientificamente (Tabela 6). Sendo perceptível de maneira geral uma concentração mais elevada na

camada superficial (0,00 a 0,10 m) em relação à camada subsuperficial (0,10 a 0,20 m), constatado em outros estudos (GREGORY, 2006; BERGAMIN et al., 2010; CARDUCCI et al., 2014; STUMPF 2014).

Tabela 6 - Estatística descritiva, medida de posição⁸ das variáveis avaliadas, nas camadas de 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m, nas diferentes classes de solos e usos na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

Solo	Usos	Ca (m)	V (mm ³)	AS (mm ²)	DM (mm)	C (mm)
SXe2	PASTAGEM (PA)	0,00 - 0,10	318,83	1233,33	0,61	417,90
		0,10 - 0,20	105,33	389,34	0,41	142,38
	V. ESPONTANEA (VE)	0,00 - 0,10	560,91	1545,72	1,10	459,93
		0,10 - 0,20	264,96	668,75	1,20	232,57
	MATA NATIVA (MN)	0,00 - 0,10	1919,36	5482,91	1,47	1998,31
		0,10 - 0,20	777,78	2517,50	0,95	1004,16
	PASTAGEM (PA)	0,00 - 0,10	68,79	331,69	0,38	130,72
		0,10 - 0,20	157,23	633,66	0,46	220,49
PVad7	V. ESPONTANEA (VE)	0,00 - 0,10	320,15	1088,33	0,73	338,68
		0,10 - 0,20	249,21	967,01	0,58	329,80
	MATA NATIVA (MN)	0,00 - 0,10	457,67	1953,22	1,07	703,58
		0,10 - 0,20	2563,25	4004,78	1,17	1017,38
	PASTAGEM (PA)	0,00 - 0,10	870,50	3246,81	0,67	1077,88
		0,10 - 0,20	123,53	581,48	0,45	223,18
RLd1	V. ESPONTANEA (VE)	0,00 - 0,10	516,08	2408,23	0,62	1011,58
		0,10 - 0,20	285,61	1142,13	0,52	418,20
	MATA NATIVA (MN)	0,00 - 0,10	321,90	1565,42	0,91	552,13
		0,10 - 0,20	1288,42	3472,89	1,69	1083,82

SXe2: Associações de Planossolo Háplico Eutrófico e Argissolo Acinzentado Eutrófico; PVad7: Associações de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico; Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico; RLd1: Associações de Neossolo Litólico Distrófico e Argissolo Amarelo Distrófico; PA: Pastagem; VE: Vegetação espontânea; MN: Mata Nativa; Ca: Camada de solo; V: Volume radicular; AS: Área superficial radicular; DM: Diâmetro médio radicular; C: Comprimento radicular.

Salienta-se que nos usos de MN das classes de solo PVad7 e RLd1, bem como, a PA da classe de solo PVad 7 apresentaram uma concentração mais elevada na camada de solo subsuperficial (0,10 a 0,20 m) em relação à camada subsuperficial (0,00 a 0,10m m), justificadas, devido à presença de raízes robustas nas camadas subsuperficiais como por exemplo pode ser observado na Figura 28 na MN. Na PA-PVad7 percebe-se uma concentração reduzida de raízes na camada superficial, com o menor DM e possivelmente associadas às condições físicas mais

⁸ Valor médio extraído dos resultados totais dos perfis de solo analisado de acordo com uso e associação de solo. Apêndice F resultados por perfil.

restritivas como os elevados valores médios de Ds e RP observados nos respectivo uso e classe de solo (exemplo Figura 29), sendo mais evidente o crescimento radicular na camada subsuperficial.

Estudos descrevem que quando as raízes se deparam com um poro no solo de diâmetro é menor que o seu, só prosseguirá se expandindo se for capaz de exercer pressão suficiente para dilatar o poro, ou então, terá que diminuir seu diâmetro para passar através dele (CAMARGO; ALLEONI, 1997), salienta-se ainda que algumas culturas, o diâmetro da raiz, quando encontra tais obstáculos, aumenta ao invés diminuir (FREDDI et al., 2007).

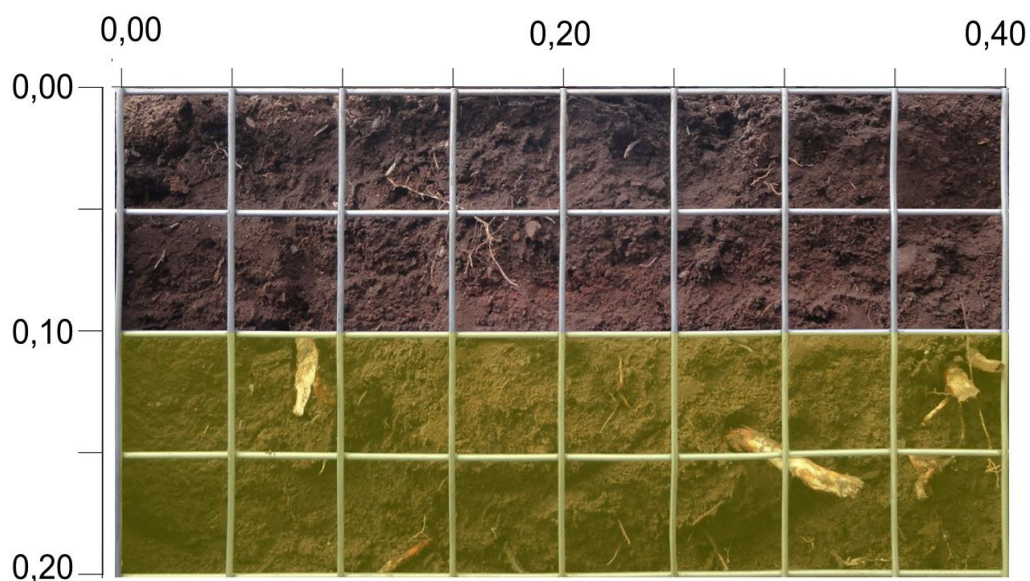


Figura 28 – Perfil de raízes, uso mata nativa, associações de solo PVad 7, ênfase camada de solo de 0,10 a 0,20 m, sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

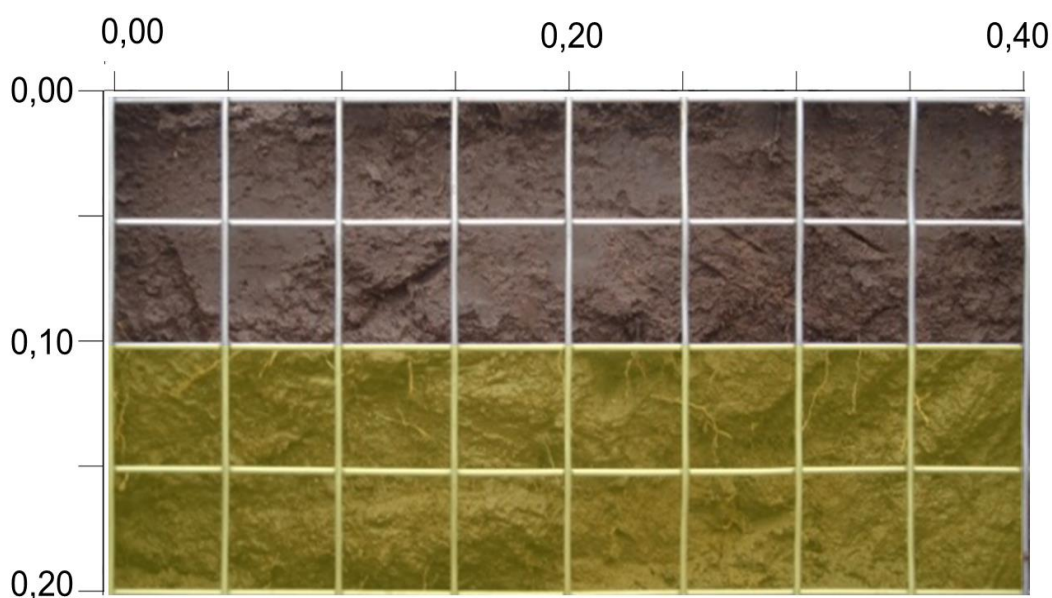


Figura 29 – Perfil de raízes, uso pastagem, associações de solo PVad 7, ênfase camada de solo de 0,10 a 0,20 m, sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

Observa-se que os valores do volume radicular (V) variaram de 68,79 a 1919,36 mm³ na camada superficial e de 105,33 a 2563,25 mm³ na camada subsuperficial, sendo os maiores encontrados em área sob MN, e os menores em área de PA. PAES (2015), comparando o V de sistemas de uso em relação ao sistema natural constatou melhores condições biológicas no sistema natural proporcionando maior adição de material orgânico e um volume radicular superior aos sistemas de usos.

Quanto a área superficial radicular (AS) e comprimento radicular (C), verificou-se tendência similar ao comportamento do V, em geral, a redução do valor médio com a profundidade. Os maiores valores observados foram em MN, e os menores PA. Segundo Schachtman et al. (1998), a AS é uma das principais características de sistema radicular, sendo responsável pela eficiência na utilização de fósforo, em vistas desse elemento, apresentar baixa mobilidade no solo. O C radicular mensura a capacidade de explorar o volume de solo, podendo proporcionar informações em relação às mudanças no ambiente, como por exemplo, em condições de seca, a cultura do milho pode apresentar sistema radicular mais extenso para suprir a necessidade de água (MARUYIAMA, 2016).

Salienta-se que os atributos radiculares V, AS e C na associação de solo RLd1 apresentaram tendências diferentes das demais classes de solo em relação aos usos. Nota-se uma maior concentração radicular na camada superficial na PA e VE em relação a MN, fato que pode estar associado à elevada Ma e os reduzidos valores médios de Ds e RP do solo.

Os valores do diâmetro médio radicular (DM) variaram de 0,38 a 1,47 mm na camada superficial e de 0,41 a 1,69 mm na camada subsuperficial. Esta variação do DM esta relacionada às diferentes espécies de plantas avaliadas. Segundo Beyer et al. (2013) espécies distintas de plantas podem demonstrar um comportamento diferente do diâmetro radicular sob as mesmas condições.

As Figuras 30, 31 e 32 apresentam a distribuição percentual das variáveis radiculares (V, AS e C) em relação à classificação de diâmetros radiculares proposta, nas respectivas associações de solo, usos e camadas avaliadas.

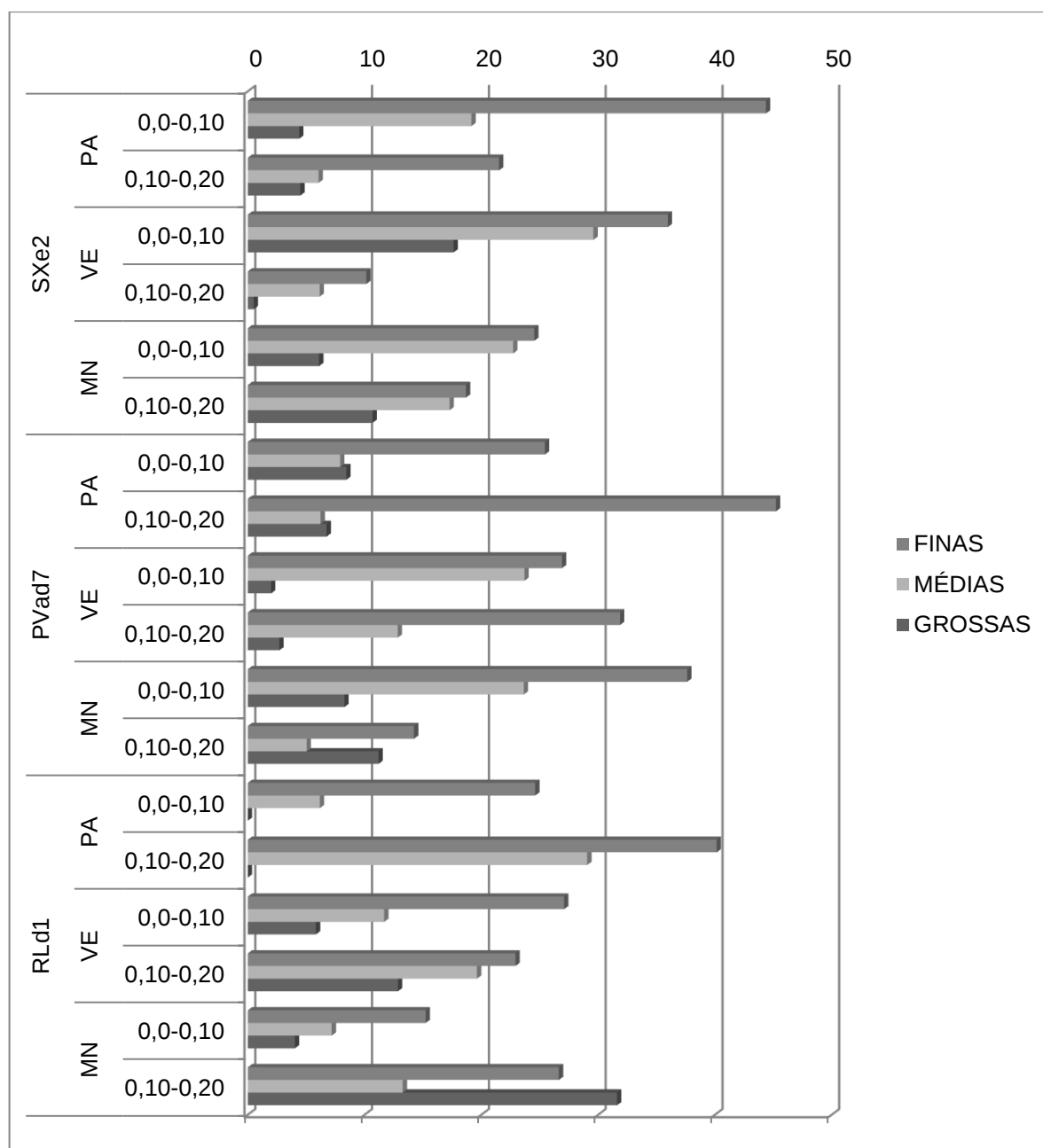


Figura 30 – Distribuição percentual do volume das raízes em relação classificação de diâmetros nas respectivas associações de solo, usos e camadas avaliadas na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

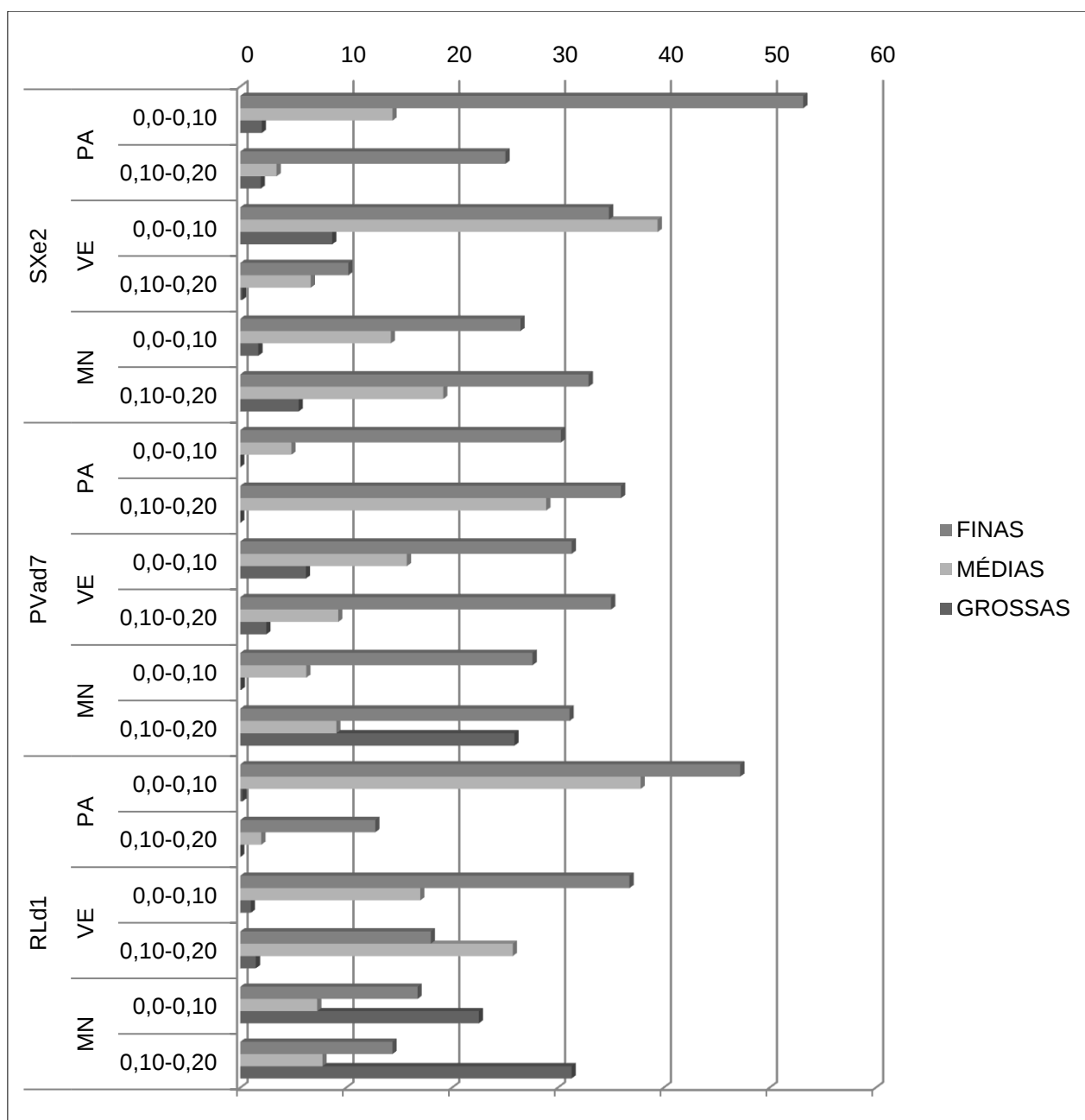


Figura 31 – Distribuição percentual da área superficial das raízes em relação à classificação de diâmetros nas respectivas associações de solo usos e camadas avaliadas na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

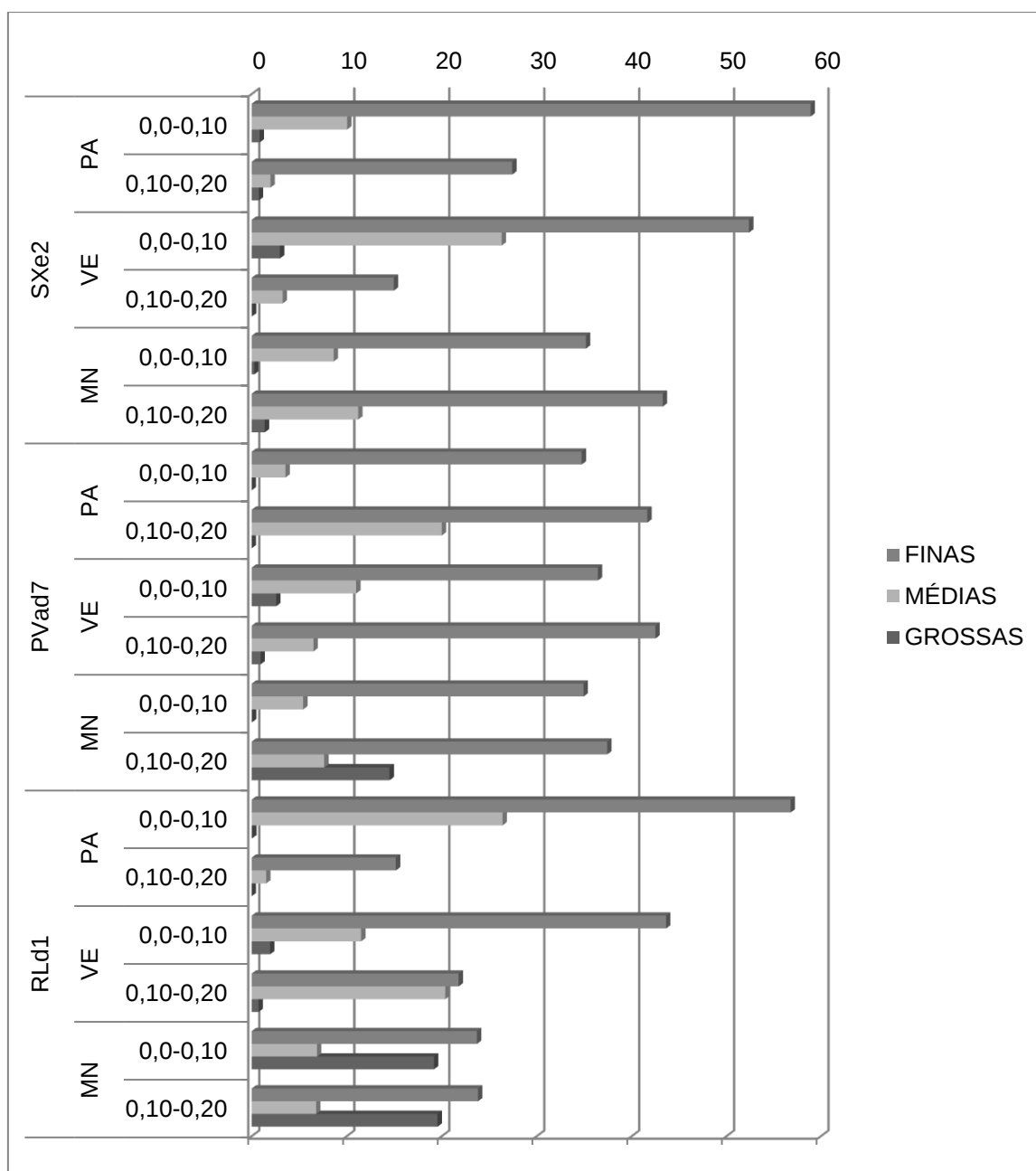


Figura 32 – Distribuição percentual do comprimento das raízes em relação classificação de diâmetros nas respectivas associações de solo, usos e camadas avaliadas na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

Nota-se uma maior proporção de raízes finas quando comparadas com as classes médias e grossas, em ambas as camadas, usos e associações de solo estudadas. Pesquisadores destacam que grande parte do sistema radicular das plantas é formada por raízes finas (JACKSON et al., 1996). Essa classe de raízes tem como características a alta eficiência na absorção de água e aquisição de nutrientes, devido à elevada permeabilidade da membrana (PRITCHETT, 1986; GAITÁN et al., 2005), e apresentam o ciclo vital muito rápido (morte e regeneração)

e contribuem para elevação da quantidade de bioporos, nos quais ocorrem as trocas gasosas, o fluxo descendente de água (ABREU et al., 2004) e o crescimento das raízes das plantas subsequentes (WILLIAMS; WEIL, 2004).

No entanto salienta-se para as variáveis AS e V nos usos de MN-RLd1 em ambas as camadas e VE-RLd1 e VE-SXe2 na camada superficial apresentaram um percentual de raízes grossas e médias maiores que percentual de raízes finas, possivelmente em decorrência de esses ambientes terem nas proximidades árvores e arbustos que são portadores de raízes grandes (comparativamente às herbáceas), profundas e que constituem o esqueleto de fixação no solo. Pesquisas sugerem que as raízes grossas são responsáveis pela sustentação da planta enquanto as raízes médias são mais eficientes na aquisição dos recursos edáficos (GREGORY, 2006).

A pastagem independente da associação de solo e camada apresentou percentual de raízes finas superiores aos de raízes grossas e médias, devido ao sistema radicular fasciculado, característico das gramíneas, ratificando a alta capacidade de exploração das camadas mais superficiais do solo, em busca de água e nutrientes (MURARO, 2004).

6.2.2 Análise de correlação Spearman entre os atributos radiculares e as variáveis físicas, COT e frações granulométricas

Para analisar o grau de relação entre as variáveis utilizou-se o coeficiente de correlação de Spearman, tendo em vista que este coeficiente não é sensível a assimetrias na distribuição dos dados, nem à presença de *outliers*, não exigindo, portanto que os dados decorram de duas amostras com distribuição normal.

A Tabela 7 apresenta matriz de correlação dos resultados obtidos para o coeficiente de correlação de Spearman (r_s) entre os atributos radiculares e as variáveis físicas do solo, o teor COT e suas frações, com intuito de avaliar a força e a direção da relação entre duas variáveis.

Tabela 7 – Matriz de Correlação de Spearman atributos radiculares, atributos físicos, carbono orgânico total e suas frações granulométricas.

	V	AS	DM	C	Ds	PT	Ma	Mi	RP	COT	COp	COam
V	1,00											
AS	0,96*	1,00										
DM	0,75*	0,69*	1,00									
C	0,93*	0,99*	0,67	1,00								
Ds	-0,74*	-0,78*	-0,41*	-0,80*	1,00							
PT	0,69*	0,64*	0,39*	0,64*	-0,80*	1,00						
Ma	0,53	0,52	0,23	0,54	-0,75	0,89	1,00					
Mi	0,66	0,59	0,41	0,56	-0,51	0,70	0,34	1,00				
RP	-0,81*	-0,80*	-0,69*	-0,79*	0,85*	-0,78*	-0,73	-0,53	1,00			
COT	0,61*	0,67*	0,42	0,68*	-0,63*	0,43	0,28	0,40	-0,53*	1,00		
COp	0,72	0,78	0,55	0,78	-0,71	0,59	0,47	0,46	-0,69	0,93	1,00	
COam	0,59	0,65	0,40	0,67	-0,63	0,42	0,27	0,40	-0,52	0,99	0,92	1,00

V: Volume radicular; AS: Área superficial radicular; DM: Diâmetro médio radicular; C: Comprimento radicular; Ds: Densidade do solo; PT: Porosidade Total do solo; Ma: Macroporosidade do solo; Mi: Microporosidade do solo; Resistência à penetração; COT: Carbono orgânico total; COp: Carbono orgânico particulado; COam: Carbono orgânico associado a fração mineral. * Significativo a 0,05 o nível significância.

Analisando as correlações entre os atributos radiculares, físicos, COT e suas frações, verificou-se elevado número de correlações significativas. Sendo importante ressaltar que todos os atributos radiculares correlacionaram-se negativamente com a Ds e RP sugerindo que enquanto os valores das componentes de uma variável aumentam, os valores das componentes da outra variável diminuem corroborando com uma série de estudos científicos.

No entanto, pesquisas em experimentos agronômicos verificaram que a compactação do solo influenciou tanto negativamente o comprimento, o volume, a superfície e o diâmetro médio radicular quanto positivamente, até 0,20 m, sendo a que a resposta à compactação depende da espécie vegetal (BERGAMIN et al., 2010; VALADÃO et al., 2015).

Os atributos radiculares correlacionaram-se positivamente com a PT. Kiehl (1979) ressalta que esta relação está ligada à dinâmica do armazenamento e do movimento de solutos e de circulação de gases no interior do solo, sendo essenciais aos processos bioquímicos das plantas e seu desenvolvimento.

A PT e COT correlacionaram-se negativamente com Ds e RP sendo que esta relação é amplamente discutida na literatura científica (FREITAS et al., 2018; REIS et al., 2016; SHIAVO; COLODRO 2016; MARCOLAN; PAULINO 2013; ANGHINONI, 2006). Estudos mencionam que aumento do teor de COT reduz a Ds

e, conseqüentemente eleva a porosidade, que por sua vez, aumenta os pontos de fraqueza intra e inter agregados reduzindo a RP.

O COT correlacionou-se positivamente com atributos radiculares V, AS e C inferindo que a maior concentração de raízes no solo tende a produzir maiores quantidades de carbono orgânico (BAQUERO et al., 2012). Izquierdo et al. (2005), ressalta que o principal forma de incorporação do carbono orgânico no solo se dá pela decomposição dos resíduos da parte aérea e raízes. No entanto, estudos sugerem que a contribuição das raízes para a COT do solo é cerca de 30% maior que a da parte aérea (RASSE; RUMPEL; DIGNAC, 2005; ROSSI et al., 2011).

Por fim, aborda-se que atributos radiculares V, AS e C correlacionaram positivamente entre si, uma vez que estão intrinsecamente associados. Segundo Muraro (2004) o V radicular é determinado em função do C e da área ocupada pelas raízes, associada ao diâmetro.

6.2.3 Análise de dependência espacial das variáveis radiculares

Para análise de geoestatística os dados foram desagrupados, ou seja, foram realizadas as análises por gride de raízes. Inicialmente foi procedida a análise de estatística descritiva das medidas de posição, dispersão e o teste de Saphiro-Wilk para verificar a distribuição das séries em relação à distribuição normal. As tabelas 8, 9 e 10 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 8 - Estatística descritiva com medidas de posição, de dispersão, de forma, teste de normalidade dos atributos radiculares na associação de solo SXe2.

Uso	Ponto	P	M	Med	Min	Max	DP	CV	Ass	Kurt	SW
PA	1	V	7,25	4,59	0,15	32	8,52	117,56	1,69	2,17	NN
		AS	30,2	21	0,83	89,81	27,68	91,63	0,99	-0,06	NN
		DM	0,38	0,25	0,22	1,45	0,26	67,26	2,45	7,9	NN
		C	11,74	9,76	0,36	37,01	10,56	90	1,18	0,79	NN
	2	V	14,04	4,34	0,00	111,01	23,37	176,6	2,66	7,84	NN
		AS	56,86	25,46	0,00	320,34	77,92	137,04	1,84	3,28	NN
		DM	0,48	0,25	0,00	1,55	0,4	83,81	1,6	2,3	NN
		C	23,41	13,83	0,00	107,21	28,56	122	1,54	3,51	NN
VE	1	V	30,41	5,58	0,00	245,46	60,08	197,57	2,93	8,5	NN
		AS	83,03	24,58	0,00	554,13	133,3	160,57	2,38	5,78	NN
		DM	0,62	0,3	0,00	1,92	0,51	80,51	1,31	0,88	NN
		C	22,42	8,48	0,00	148,49	32,69	145,78	2,37	6,49	NN
	2	V	21,21	12,38	0,80	76,78	19,42	91,61	1,27	1,14	NN
		AS	55,37	48,67	6,86	119,31	33,35	60,24	0,57	-0,66	N
		DM	1,76	2,29	0,07	2,93	1,05	59,66	0,01	-1,1	NN
		C	20,86	16,68	5,48	47,34	11,44	54,85	0,76	-0,36	NN
MN	1	V	98,31	54,71	3,63	369,47	95,47	97,32	1,23	0,76	NN
		AS	255,29	204,63	31,18	659,1	180	70,51	0,94	-0,04	N
		DM	1,48	1,87	0,20	3,24	0,79	53,38	0,007	-1,12	NN
		C	95,33	75,21	24,93	263,02	61,45	64,47	1,13	0,60	NN
	2	V	70,26	23,87	0,44	501,89	121,46	172,87	2,95	8,63	NN
		AS	244,74	107,75	3,33	1704,55	359,01	146,96	2,77	8,65	NN
		DM	0,95	0,72	0,10	2,16	0,66	69,42	0,92	0,6	NN
		C	70,26	51,31	4,63	639,54	126,11	136,6	3,08	11,4	NN

PA: Pastagem; VE: Vegetação espontânea; MN: Mata nativa; P: Parâmetro radicular; V: Volume radicular; AS: Área superficial radicular; DM: Diâmetro médio radicular; C: Comprimento radicular; M: média; Med: mediana; Min: Mínimo; Max: Máximo; DP: Desvio padrão; CV: Coeficiente de variação; Ass: Assimetria; Kurt: Curtose; SW: Saphiro-Wilk à 5%; N: Segue a distribuição normal, NN: Não segue a distribuição normal.

Tabela 9 - Estatística descritiva com medidas de posição, de dispersão, de forma, teste de normalidade dos atributos radiculares na associação de solo PVad7.

Uso	Ponto	P	M	Med	Min	Max	DP	CV	Ass	Kurt	SW
PA	1	V	6,82	3,13	0,00	56,58	10,07	147,74	4,11	20,08	NN
		AS	28,3	15,66	0,00	143,17	28,79	101,73	2,22	7,1	NN
		DM	0,4	0,27	0,00	0,8	0,22	54,23	0,54	-1,22	NN
		C	10,09	6,35	0,00	29,29	8,24	81,73	0,78	-0,51	NN
	2	V	7,3	2,44	0,00	31,4	8,77	120,02	1,29	0,83	NN
		AS	32,03	12,44	0,00	116,37	35,53	110,93	1,00	-0,16	NN
		DM	0,44	0,59	0,00	0,74	0,26	58,85	-0,61	-1,21	NN
		C	11,86	5,33	0,00	38,97	12,46	105,08	0,82	-0,62	NN
VE	1	V	18,77	8,65	0,00	111,06	26,83	142,94	2,59	6,66	NN
		AS	67,9	38,49	0,00	284,99	72,67	107,04	1,67	2,34	NN
		DM	0,61	0,68	0,00	1,66	0,4	65,28	1,22	1,67	NN
		C	22,29	14,86	0,00	78,84	20,42	91,63	1,18	0,79	NN
	2	V	16,81	10,61	0,43	87,83	19,94	118,64	2,49	6,37	NN
		AS	60,56	46,51	1,99	235,9	53,04	87,58	1,78	3,34	NN
		DM	0,69	0,69	0,27	1,71	0,41	59,78	1,07	0,82	NN
		C	19,48	15,65	0,74	62,51	14,11	72,41	1,25	1,51	N
MN	1	V	151,03	20,16	1,11	2083,75	437,28	289,54	3,88	14,83	NN
		AS	206,71	90,49	3,14	1364,65	328,32	158,83	2,86	7,94	NN
		DM	1,04	1,48	0,27	3,88	0,79	76,34	1,27	0,61	NN
		C	47,01	54,35	0,72	262,12	52,17	110,97	2,82	9,42	NN
	2	V	37,78	23,51	0,00	190,03	46,15	122,16	1,97	3,41	NN
		AS	165,67	97,37	0,00	786,25	201,62	121,7	1,89	2,76	NN
		DM	1,20	1,55	0,00	2,04	0,58	48,33	-0,56	-1,1	NN
		C	60,55	37,79	0,00	69,7	72,45	119,66	1,83	2,44	NN

PA: Pastagem; VE: Vegetação espontânea; MN: Mata nativa; P: Parâmetro radicular; V: Volume radicular; AS: Área superficial radicular; DM: Diâmetro médio radicular; C: Comprimento radicular; M: média; Med: mediana; Min: Mínimo; Max: Máximo; DP: Desvio padrão; CV: Coeficiente de variação; Ass: Assimetria; Kurt: Curtose; SW: Saphiro-Wilk à 5%; N: Segue a distribuição normal, NN: Não segue a distribuição normal.

Tabela 10 - Estatística descritiva com medidas de posição, de dispersão, de forma, teste de normalidade dos atributos radiculares na associação de solo RLd1.

Uso	Ponto	P	M	Med	Min	Max	DP	CV	Ass	Kurt	SW
PA	1	V	34,87	13,30	0,00	271,57	52,93	168,97	2,84	8,67	NN
		AS	144,14	65,05	0,00	974,72	224,85	155,99	2,57	6,56	NN
		DM	0,63	0,64	0,00	1,99	0,31	49,96	2,23	11,24	NN
		C	51,96	25,83	0,00	320,63	77,46	149,08	2,42	5,48	NN
	2	V	27,25	4,82	0,32	400,71	72,66	266,65	4,71	24,08	NN
		AS	95,12	23,46	1,57	1281,69	231,60	243,47	4,66	23,74	NN
		DM	0,48	0,28	0,26	0,96	0,25	51,81	0,45	-1,60	NN
		C	29,36	8,74	0,61	365,11	65,85	224,32	4,60	23,24	NN
VE	1	V	10,27	3,91	0,00	109,64	20,67	201,34	3,92	17,81	NN
		AS	33,25	18,93	0,00	277,59	53,39	160,60	3,43	14,22	NN
		DM	0,48	0,27	0,00	1,78	0,49	100,55	1,33	1,14	NN
		C	9,50	7,33	0,00	59,13	11,85	124,76	2,68	9,38	NN
	2	V	39,84	26,57	0,00	175,68	47,68	102,11	1,80	3,39	NN
		AS	188,65	122,76	0,00	771,24	194,24	102,98	1,80	3,01	NN
		DM	0,66	0,64	0,00	1,62	0,37	56,40	1,22	2,98	NN
		C	79,86	52,09	0,00	318,99	84,13	105,35	1,84	3,00	NN
MN	1	V	46,64	14,12	1,51	720,11	133,46	286,15	4,64	22,61	NN
		AS	96,38	59,48	7,48	720,55	142,74	148,11	3,63	13,61	NN
		DM	0,70	0,68	0,27	3,86	0,54	76,85	1,47	1,57	NN
		C	25,40	19,98	2,83	88,16	20,45	80,51	2,11	4,47	NN
	2	V	54,00	5,23	0,09	279,89	98,26	181,96	1,83	2,02	NN
		AS	218,52	29,39	0,52	1134,11	445,71	203,97	2,52	5,46	NN
		DM	0,74	0,39	0,23	4,78	0,73	97,93	1,49	1,05	NN
		C	66,22	11,49	0,24	410,91	132,44	200,01	2,45	4,83	NN

PA: Pastagem; VE: Vegetação espontânea; MN: Mata nativa; P: Parâmetro radicular; V: Volume radicular; AS: Área superficial radicular; DM: Diâmetro médio radicular; C: Comprimento radicular; M: média; Med: mediana; Min: Mínimo; Max: Máximo; DP: Desvio padrão; CV: Coeficiente de variação; Ass: Assimetria; Kurt: Curtose; SW: Saphiro-Wilk à 5%; N: Segue a distribuição normal, NN: Não segue a distribuição normal.

Com base nos resultados obtidos é possível constatar um elevado distanciamento entre valores da média em relação à mediana dos parâmetros radiculares conferindo tendência de que os dados não seguem uma distribuição normal (LITTLE: HILLS, 1978).

Os valores mínimos e máximos demonstram uma elevada amplitude e dispersão dos dados. Segundo CAHN et al. (1994) com base nessa análise é possível identificar um provável *outlier* ou um erro de entrada de dados. Salienta-se que o valor de 0 discriminado nas planilhas remetem a ausência de constatação de raízes em algum ponto analisado da malha amostral.

Os coeficientes de variação (CV) dos atributos radiculares indicaram elevada heterogeneidade dos dados, em decorrência dos altos valores constatados ($CV > 35\%$). Conforme Wilding; Drees (1983), esses resultados indicam uma alta dispersão dados, o que já era esperado, por se não tratar de uma pesquisa experimental, com fatores controlados. Segundo Muraro (2004) valores de coeficientes de variação acima de 50% são comuns em experimentos com avaliação de raízes.

Os coeficientes de assimetria para o atributo radicular DM da associação de solo PVad7, usos PA2 e MN2 indicaram curva de distribuição de probabilidade, com valores negativos, inferindo que a média está deslocada para o lado direito de um histograma. As demais variáveis apresentaram assimetria positivas, sugerindo média deslocada para esquerda.

Na avaliação do coeficiente de curtose, nota-se que na associação de solo SXe2, nos usos e variáveis PA1 – AS; VE2 – AS, DM e C; MN1-AS e DM, bem como na associação de solo PVad7, usos e variáveis PA1 – DM e C; PA2 – AS, DM e C e MN2 - DM e na associação de RLd1, uso e variável PA2 – DM, classificam-se a distribuição como platicúrtica, ou seja, a função de distribuição é mais achatada do que a distribuição normal, as demais variáveis são consideradas como leptocúrtica, por possuir a curva da função de distribuição com um pico mais alto que a distribuição normal.

Percebe-se que apenas na associação de solo SXe2 nos usos e variáveis VE2 – AS; MN1- AS; bem como, na associação de solo PVad7 uso e variável VE2 – C apresentaram distribuição normal. Os demais atributos não atenderam as pressuposições do método, ou seja, distribuição dos dados não normais. Segundo Cressie (1991) a normalidade dos dados não é exigência da geoestatística.

Com base na ocorrência de distribuições assimétricas e o predomínio da distribuição não normal dos dados para a análise de dependência espacial foi utilizado o estimador da semivariância de Pairwise, considerado notavelmente e robusto e estável BABAKHANI; DEUSTCH (2012). Tem como finalidade reduzir o efeito de dados discrepantes e assimetrias por meio de ponderações (ISAACS; SRIVASTAVA 1989; LI; LAKE 1994; FELIX et al., 2016).

No sentido de observar os efeitos dos testes descritos em análise geoestatística, foram produzidos semivariogramas para cada uma das variáveis. As Figuras 33 e 34 mostram apenas os semivariogramas que apresentaram estrutura de dependência espacial.

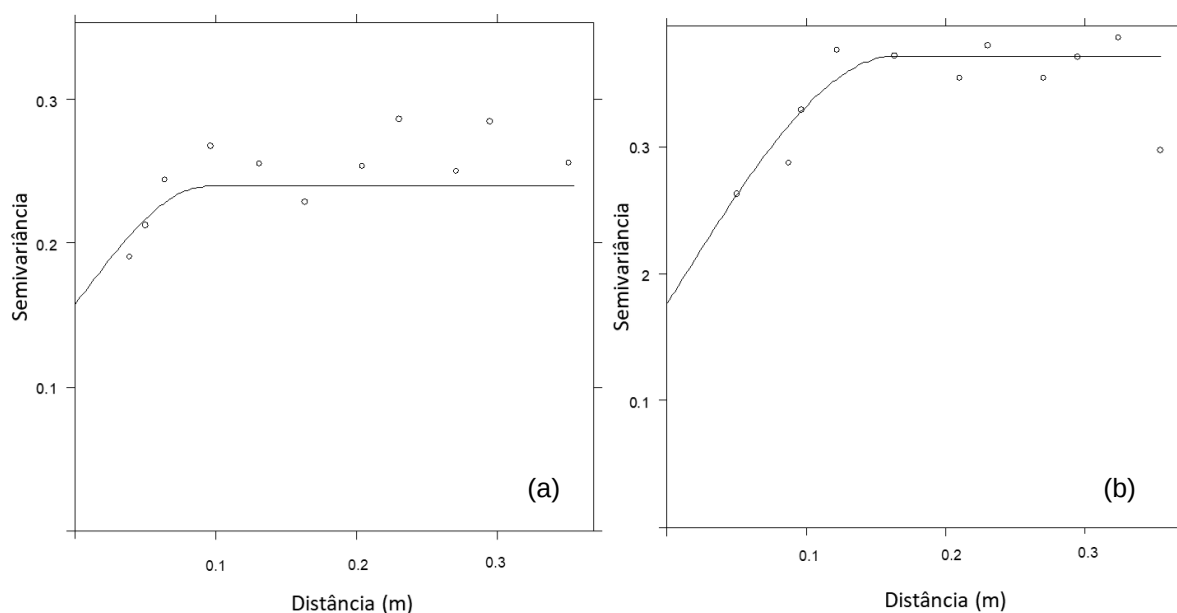


Figura 33 – Semivariogramas do diâmetro médio radicular, usos (a) vegetação espontânea (VE2) e (b) mata nativa (MN1), associação de solo SXe2 da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

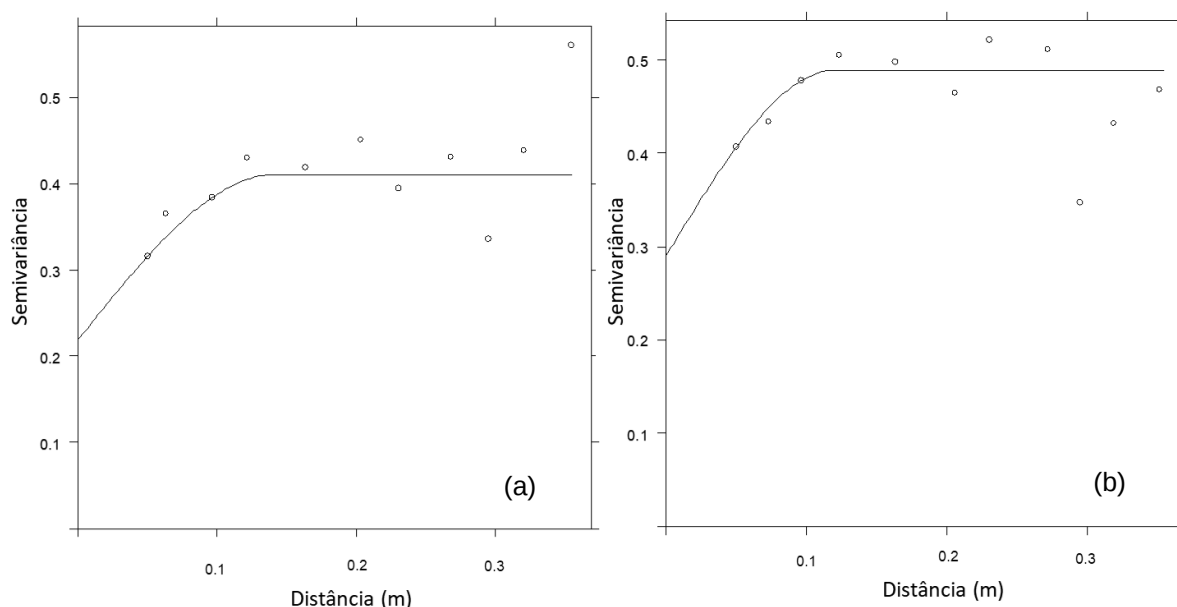


Figura 34 – Semivariogramas do diâmetro médio radicular, uso (a) mata nativa MN2, associação de solo SXe2 e uso (b) mata nativa (MN2), associação de solo PVad7 da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

Nota-se que apenas o DM dos usos VE2, MN1 e MN2 da associação de solo SXe2 e uso MN2 da associação de solo PVad7 apresentaram estrutura de

dependência espacial, as demais variáveis apresentaram efeito pepita puro, nesse caso, encontram-se com distribuição aleatória para distâncias maiores que a menor distância de amostragem, que foi de 0,05 m, distribuindo-se de forma independente no espaço, indicando que para essas variáveis a distância de amostragem não foi capaz de exibir toda a variância dos dados (CARVALHO et al., 2011).

Na tabela 11 é possível observar os parâmetros de ajuste dos semivariogramas para as variáveis que apresentaram dependência espacial. Os critérios de seleção dos modelos levaram em consideração, o grau de dependência espacial, a variância da respectiva variável, a qual deve ter concordância com o valor do patamar do semivariograma teórico e ajustado, bem como, o maior valor do coeficiente de correlação obtido pela análise de validação cruzada (VC).

O modelo teórico que melhor se ajustou a variabilidade dos dados foi o esférico. Este resultado está em consonância com os de outros autores que descrevem que este o modelo é o que melhor se ajusta para aos atributos de solo e planta (TRANGMAR et al., 1985; SOUZA et al., 1997; BERTOLANI e VIEIRA, 2001).

Em estudos recentes que adotaram os preceitos geoestatísticos para analisar a distribuição espacial das raízes ao longo do perfil de solo, apenas apresentaram resultados qualitativos não abordando os parâmetros de ajuste dos semivariogramas (CARDUCCI et al., 2013; CARDINAEL et al., 2015).

Empregando-se a escala de dependência espacial, proposta por Carbardella et al. (1994), verifica-se na tabela 11, para o semivariogramas obtidos para os dados de diâmetro médio radicular (DM) apresentaram moderada dependência espacial, visto que os valores do efeito pepita foi superior a 25% e inferior a 75 % do valor do patamar.

Os alcances constatados foram de 0,09, 0,16, 0,14 e 0,12 m. Esses valores de alcance demonstram até que ponto as amostras são correlacionadas entre si, representando desta maneira, a distância máxima de dependência espacial entre amostras (VIEIRA, 2000). Segundo Yamamoto; Landim (2013), a partir do alcance da dependência espacial é possível projetar o delineamento de futuras amostragens assegurando as mesmas condições do estudo em questão.

Os maiores alcances foram constatados em áreas de mata nativa, levantando a suspeita que essa forma de uso sofra menos impacto direto ao solo e vegetação e assim refletindo numa menor variabilidade dos atributos. Pesquisas reforçam a necessidade de avaliar variabilidade espacial da orientação preferencial da raiz, ou

anisotropia, raramente tem sido abordada na literatura científica, especialmente em campo (CHOPART et al., 2008; MAURICE et al., 2010).

Tabela 11 - Modelo teórico do semivariogramas para o atributo diâmetro médio radicular (DM), na associação de solo SXe2, sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

Solos	Usos	P	Modelo	Contribuição	Alcance	Patamar	Efeito Pepita	GDE	VC
				C	(a)	(C0 + C)	C0	%	
SXe2	VE	2	Esférico	0,08	0,09	0,24	0,16	65,55	0,42
	MN	1	Esférico	0,20	0,16	0,37	0,18	47,39	0,12
	MN	2	Esférico	0,19	0,14	0,41	0,22	53,18	0,03
PVad7	MN	2	Esférico	0,20	0,12	0,49	0,29	59,18	0,06

SXe2: Associações de Planossolo Háplico Eutrófico e Argissolo Acinzentado Eutrófico; PVad7: Associações de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico; Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico; RLd1: Associações de Neossolo Litólico distrófico e Argissolo Amarelo Distrófico; P: número do ponto VE: Vegetação espontânea; MN: Mata nativa; DM: Diâmetro médio radicular; GDE: Grau de dependência espacial; VC: coeficiente de correlação obtido pela análise de validação cruzada.

6.2.4 Interpolação dos atributos radiculares

Para melhor visualizar a interação entre a estrutura e o desenvolvimento das raízes ao longo do perfil do solo, utilizaram-se os mapas de superfície obtidos pela técnica de interpolação por krigagem quando detectada a dependência espacial do atributo, e quando não, utilizou-se o interpolador Inverso do Quadrado da Distância (IDW).

As Figuras 35 e 36 apresentam os mapas obtidos pela técnica da krigagem para o atributo diâmetro médio radicular (DM) para os usos: vegetação espontânea (VE2) e mata nativa (MN1 e MN2) em associação de solo SXe2 e para o uso mata nativa (MN2) em associação de solo PVad7.

Observando a distribuição do DM nos mapas, verificou-se que a krigagem possibilitou identificar a tendência de agrupamento de regiões com características semelhantes em relação ao comportamento do atributo radicular (DM), nota-se o predomínio de raízes com maior diâmetro na superfície do solo, com exceção do uso MN2 da associação de solo PVad7, em decorrência do número de raízes com elevado diâmetro constatadas na camada subsuperficial do solo ser maior em relação as raízes da camada superficial.

Green et al. (2006) ressaltam que o padrão de distribuição espacial de raízes ainda não é bem documentado e tão pouco as variáveis respostas associados aos

padrões de distribuição espacial. Silva Neto et al., (2012) salientam que a geoestatística possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, além de possibilitar compreensão da variabilidade das características e sua influência no ambiente.

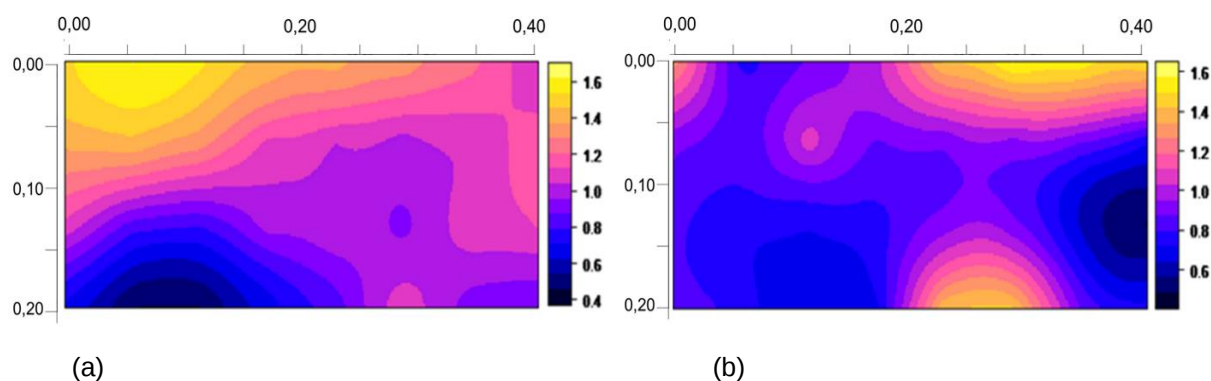


Figura 35 – Mapa da distribuição espacial do diâmetro médio radicular, usos (a) vegetação espontânea (VE2) e (b) mata nativa (MN1), associação de solo SXe2 da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

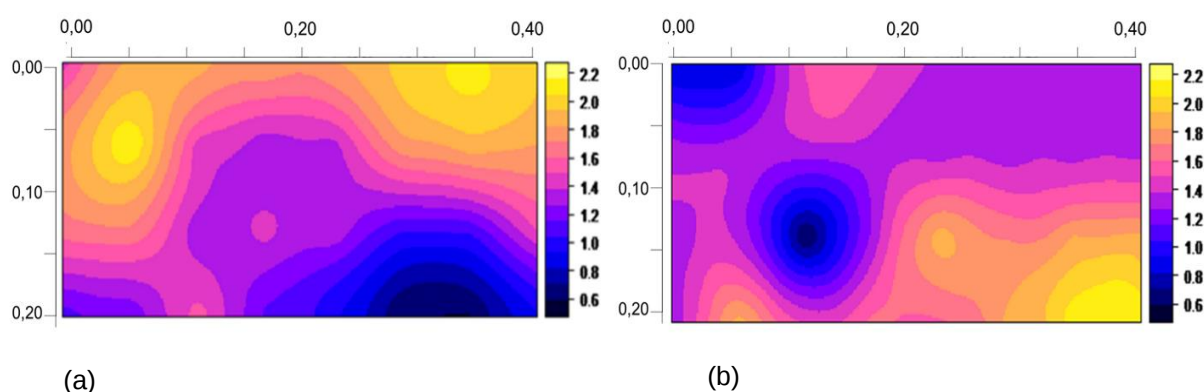


Figura 36 – Mapa da distribuição espacial do diâmetro médio radicular, uso (a) mata nativa MN2, associação de solo SXe2 e uso (b) mata nativa (MN2), associação de solo PVad7 da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

As Figuras 37 à 54 apresentam os mapas, obtidos pelo interpolador do Inverso do Quadrado da Distância (IDW) para os atributos radiculares pesquisados. Pela gradação dos tons das cores nota-se a variabilidade das variáveis estudadas ao longo dos perfis de solos (gride = 0,40 m largura x 0,20 m de profundidade). Os mapas de predição da distribuição espacial do volume, área superficial, diâmetro médio e comprimento das raízes apontam diferenças na localização dos maiores e

menores valores das variáveis, o que é característico da análise de sistemas radiculares de espécies distintas (JACKSON et al., 1996).

Conforme podem ser observados nos mapas, o solo sob de uso pastagem (PA) na associação de solo SXe2 apresentam uma distribuição desuniforme horizontal e vertical, além de ser perceptível, a redução na concentração dos atributos radiculares à medida que ocorre o aprofundamento vertical no perfil de solo, comportamento similar foi observado para o mesmo uso na associação de solo RLd1, porém com maior concentração radicular. No entanto, na associação de solo PVad7 é possível perceber uma redução na concentração dos atributos radiculares na camada de solo mais superficial, provavelmente, em decorrência de condições físicas do solo, consideradas de certa forma, limitantes como os elevados valores de Ds e RP constatados.

As maiores concentrações das variáveis radiculares foram constatados no solo sob mata nativa, possivelmente, associados a condições físicas do solo menos impeditivas, como elevadas quantidades de poros e carbono orgânico. Carducci et al. (2013) salientam que a elevada quantidade de macroporos favorecem o caminho natural do crescimento do sistema radicular da maioria das espécies vegetais. Além disso, o incremento constante de raízes e carbono orgânico das vegetações transitórias e permanentes resultam em um solo melhor estruturado, o que permite o aprofundamento das raízes no solo (PIERRET et al., 2007).

As associações de solo sob vegetação espontânea (VE) apresentaram concentrações intermediárias em relação dos valores dos atributos aos usos de pastagem e mata nativa. Salienta-se que nesses ambientes, a heterogeneidade vegetal é maior em relação as pastagem e as interferências antrópicas menores. Além do mais, pesquisas recentes no campo da biologia vegetal demonstraram que as interações interespecíficas de espécies vegetais abaixo do solo podem alterar drasticamente o crescimento das raízes em razão das interações biológicas de competição (PAYA et al., 2015).

Os mapas de IDW possibilitou verificar tendência de agrupamento de regiões que possuem características semelhantes ao comportamento dos atributos radiculares em relação ao tipo de vegetação no perfil de solo, podendo ser usada de forma a facilitar a interpretação das condições de desenvolvimento horizontal e vertical das raízes.

Estudos sobre a distribuição espacial e crescimento das raízes são conduzidos considerando a premissa que o solo tem condições homogêneas, deixando lacunas, pois o desenvolvimento e o funcionamento radicular aproveitam as condições desuniformes do solo (PIERRET et al., 2007). Reforça-se que esses ambientes são dinâmicos e heterogêneos constantemente reorganizados por organismos do solo e pelo desenvolvimento radicular (QUINTO et al., 2016).

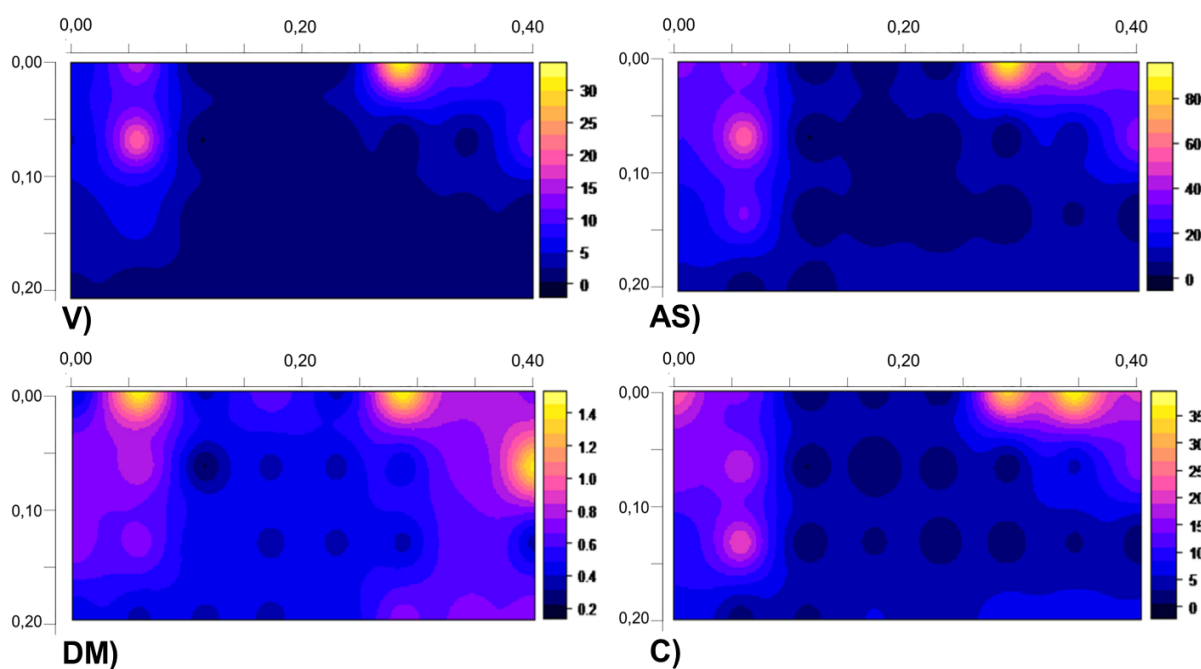


Figura 37 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso pastagem (PA1), na associação de solo SXe2, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

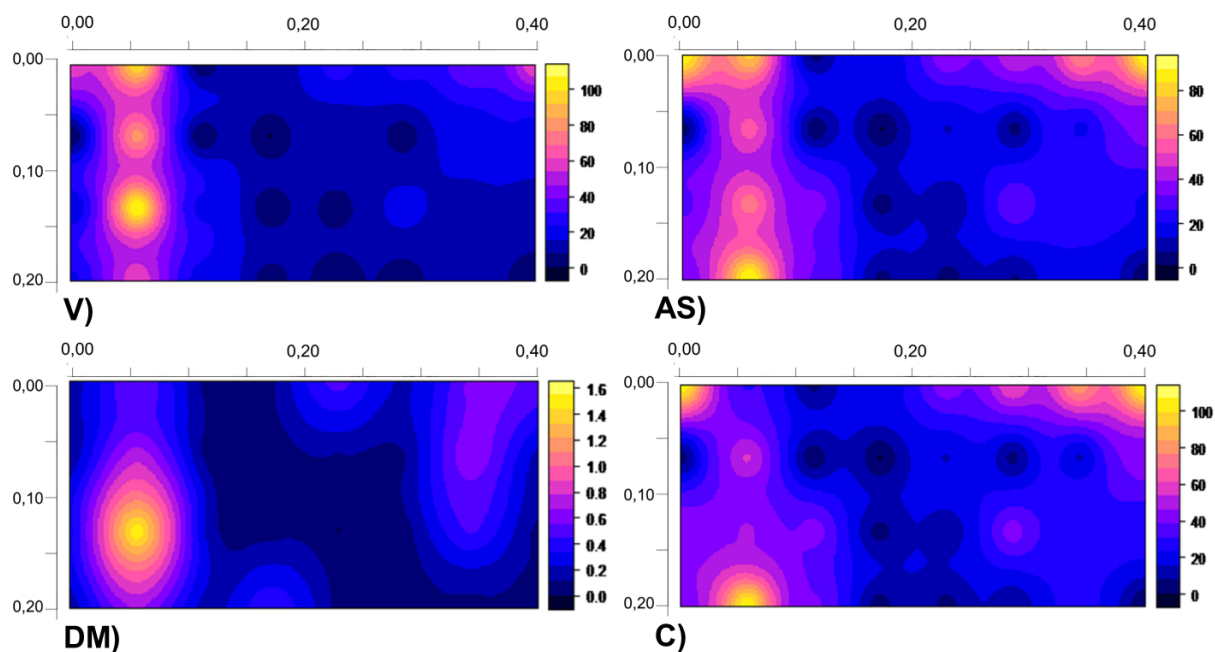


Figura 38 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso pastagem (PA2), na associação de solo SXe2, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

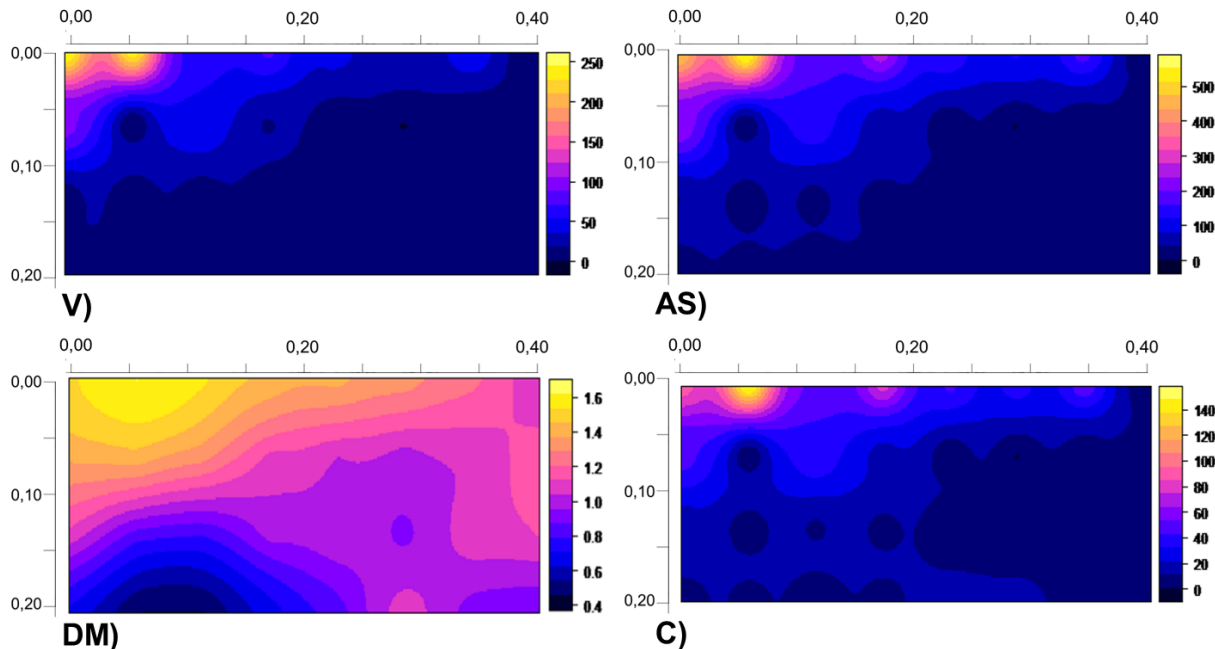


Figura 39 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso vegetação espontânea (VE1), na associação de solo SXe2, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

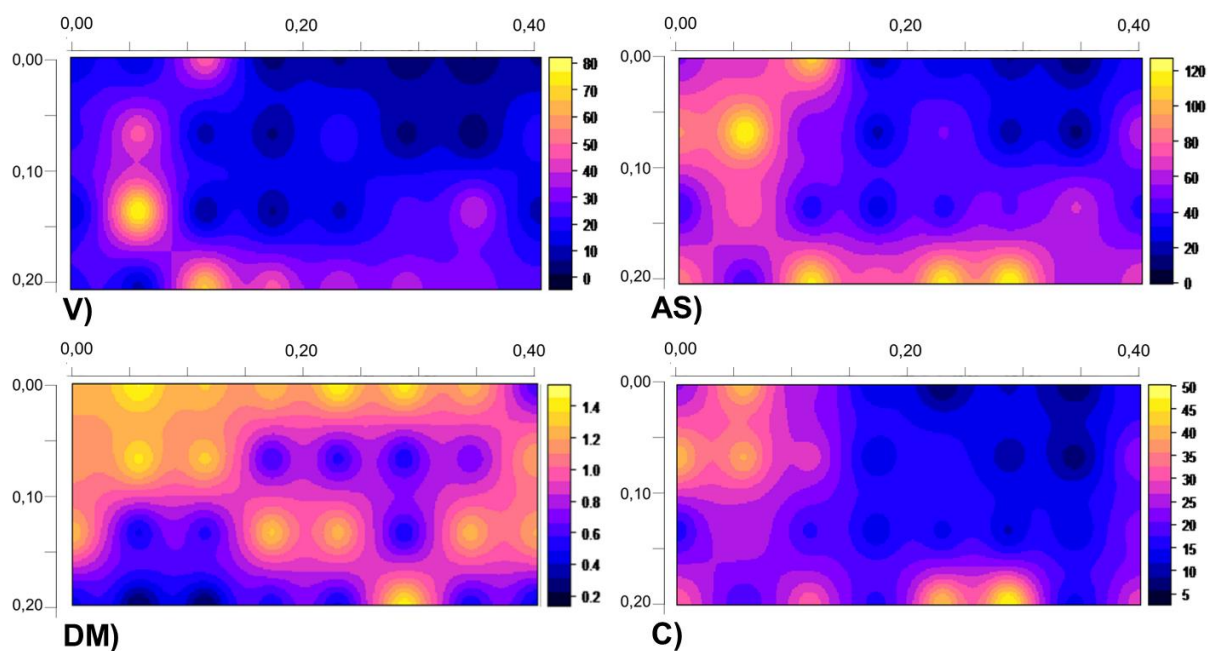


Figura 40 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso vegetação espontânea (VE2), na associação de solo SXe2, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

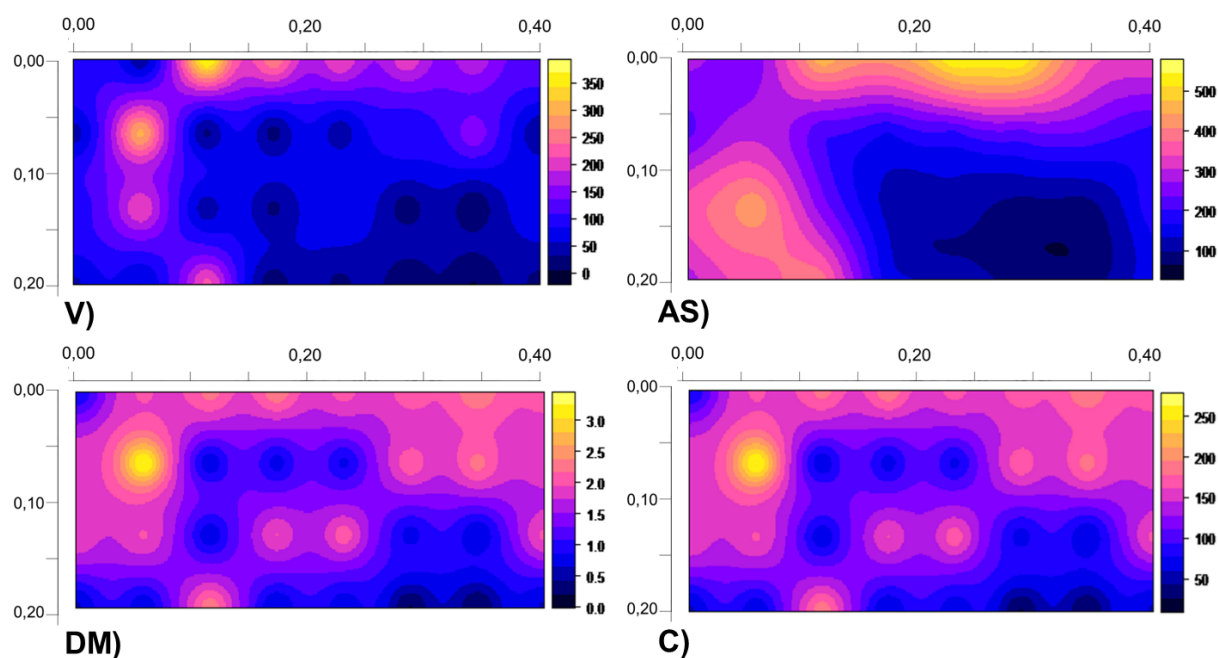


Figura 41 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso mata nativa (MN1), na associação de solo SXe2, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

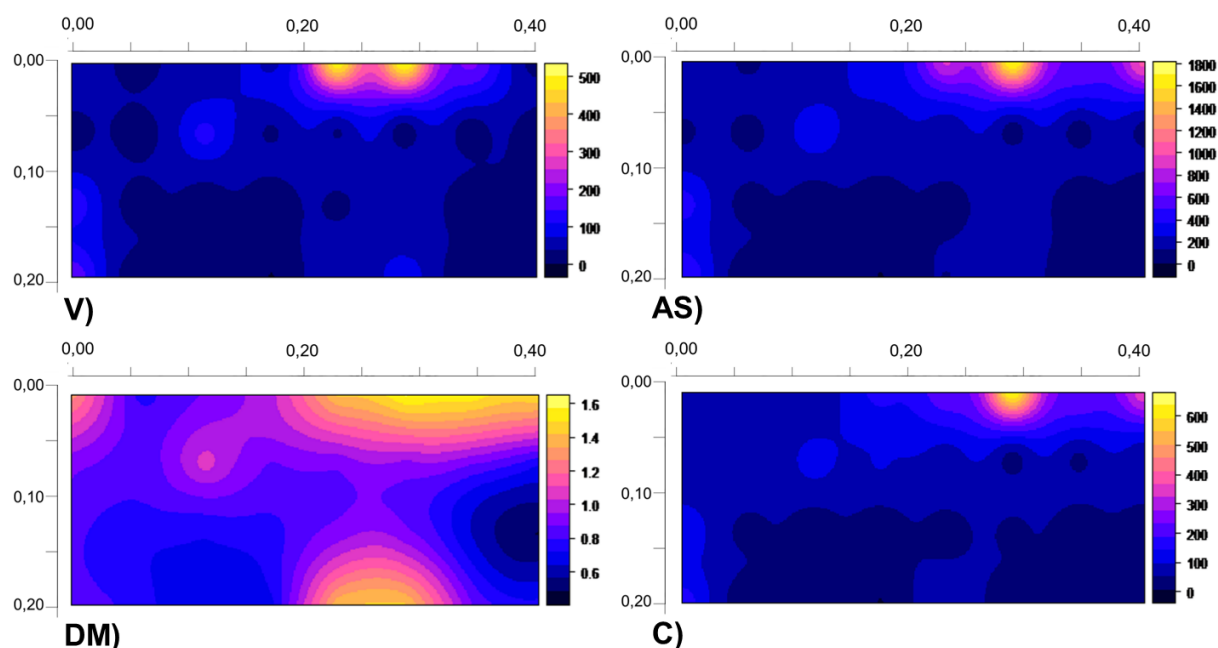


Figura 42 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso mata nativa (MN2), na associação de solo SXe2, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

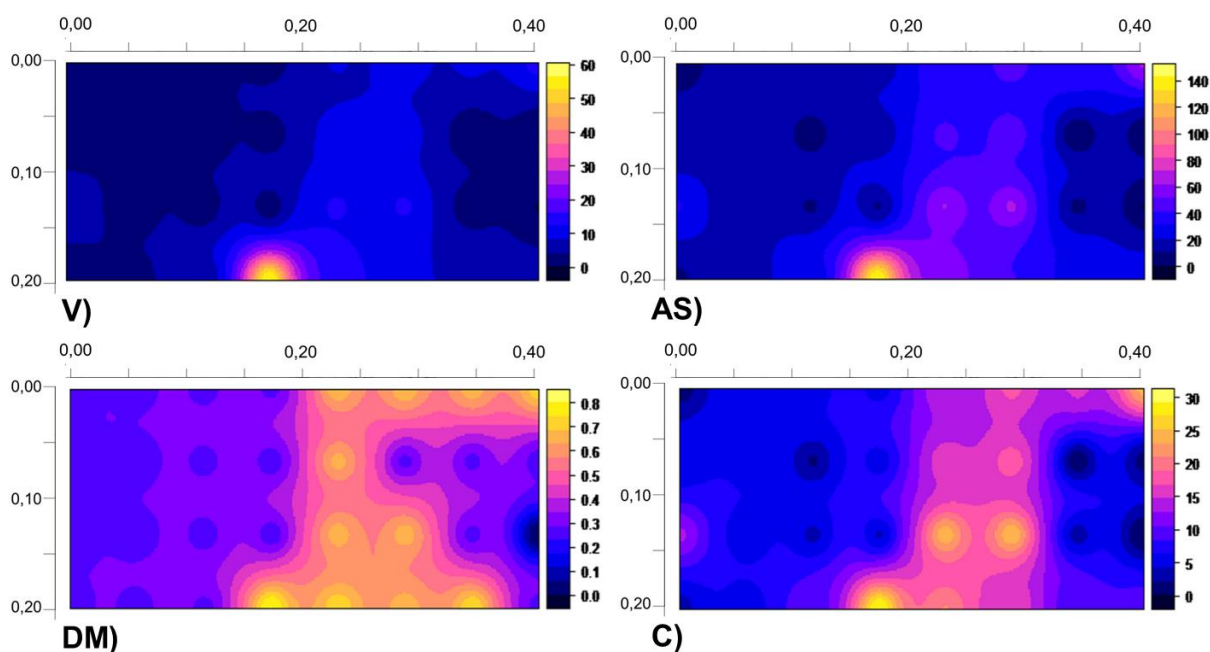


Figura 43 - Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso pastagem (PA1), na associação de solo PVad7, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

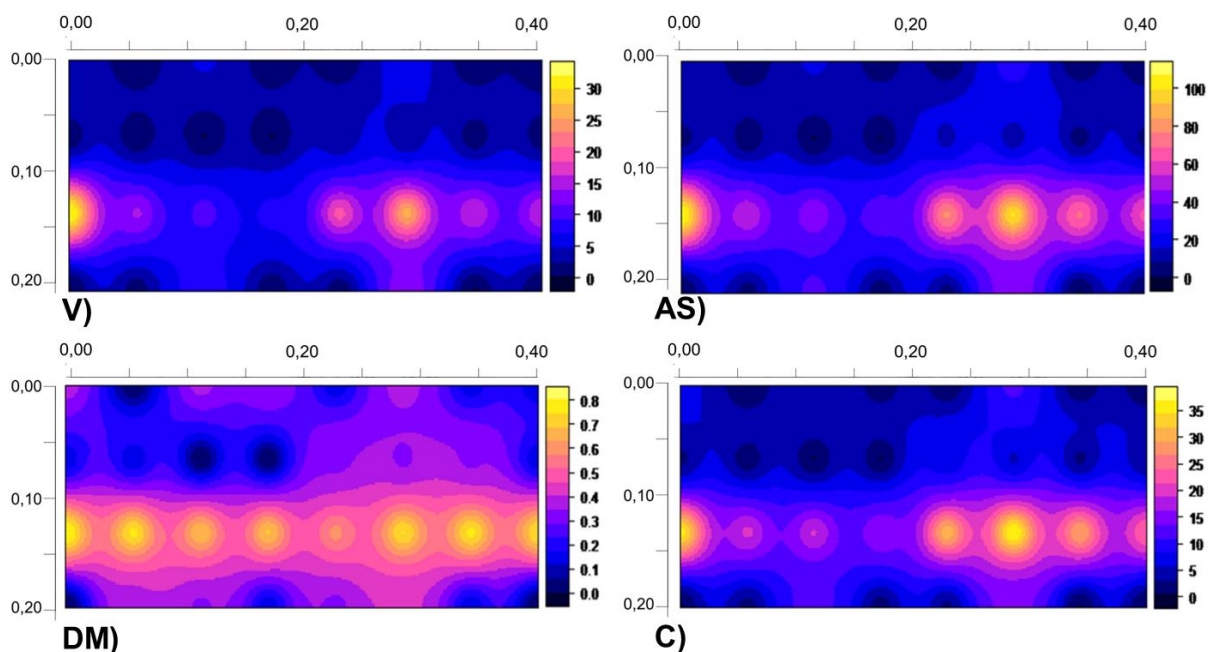


Figura 44 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso pastagem (PA2), na associação de solo PVad7, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

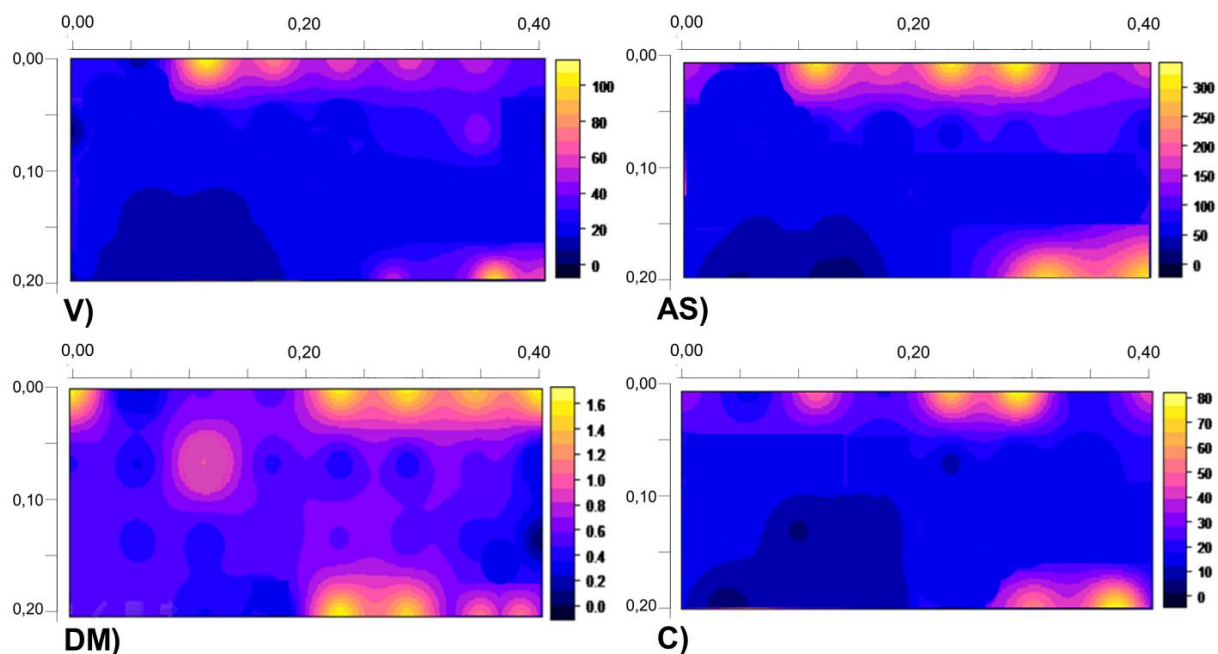


Figura 45 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso vegetação espontânea (VE1), na associação de solo PVad7, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

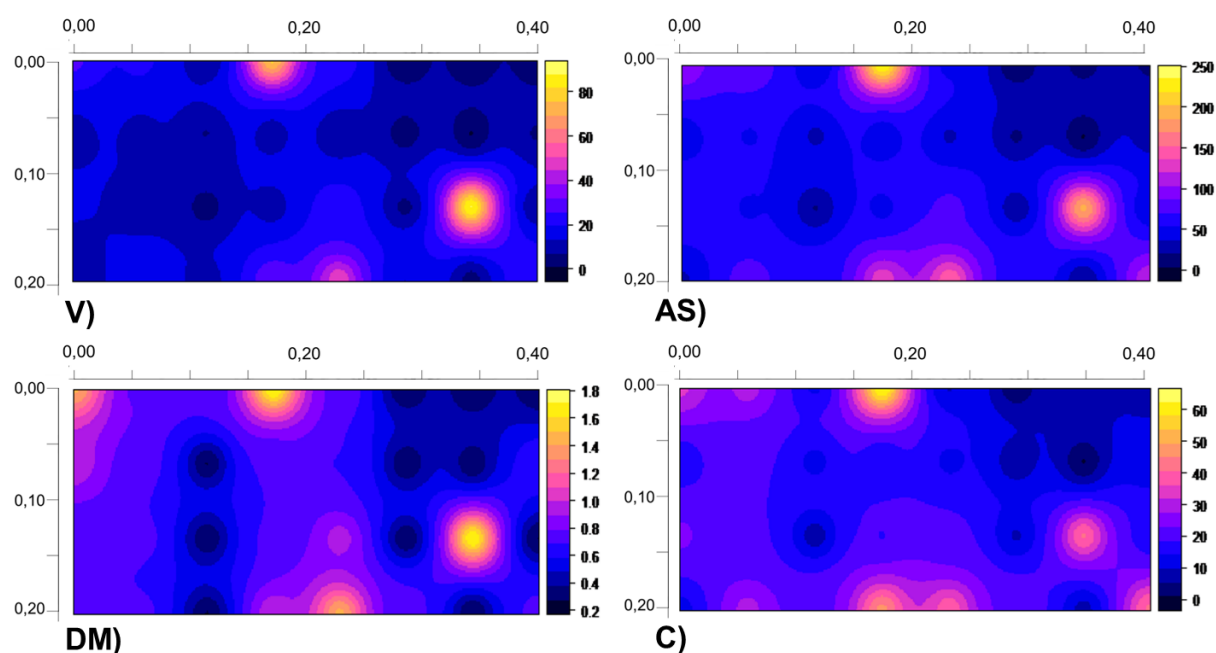


Figura 46 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso vegetação espontânea (VE2), na associação de solo PAd7, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

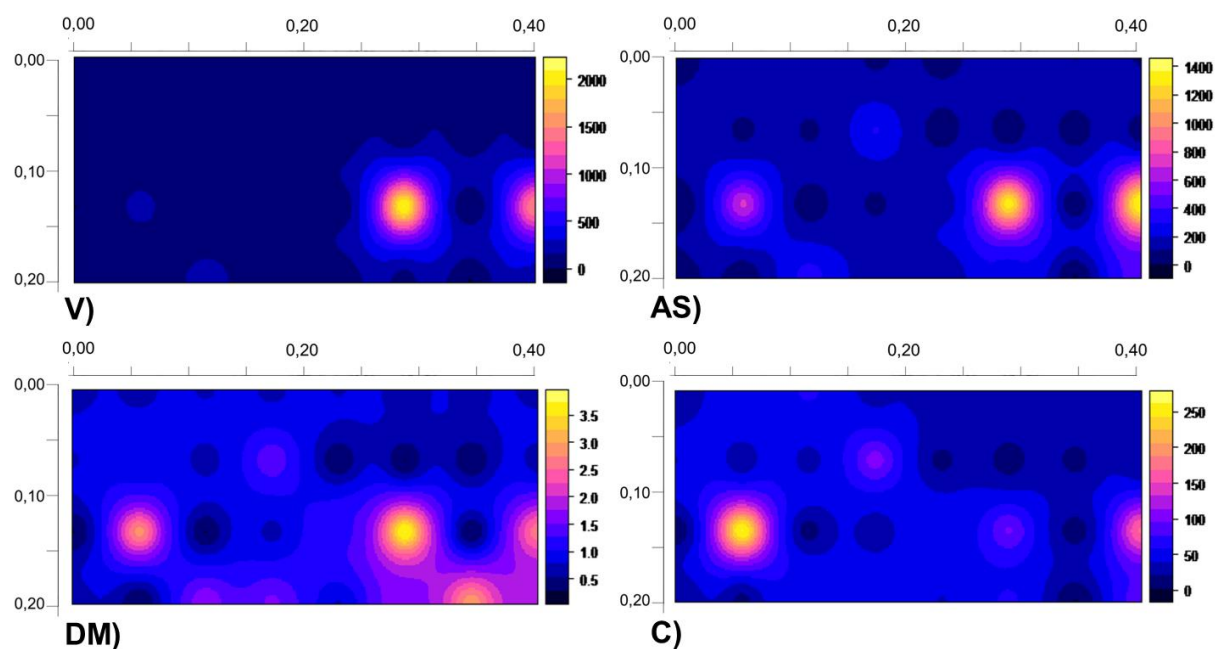


Figura 47 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso mata nativa (MN1), na associação de solo PAd7, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

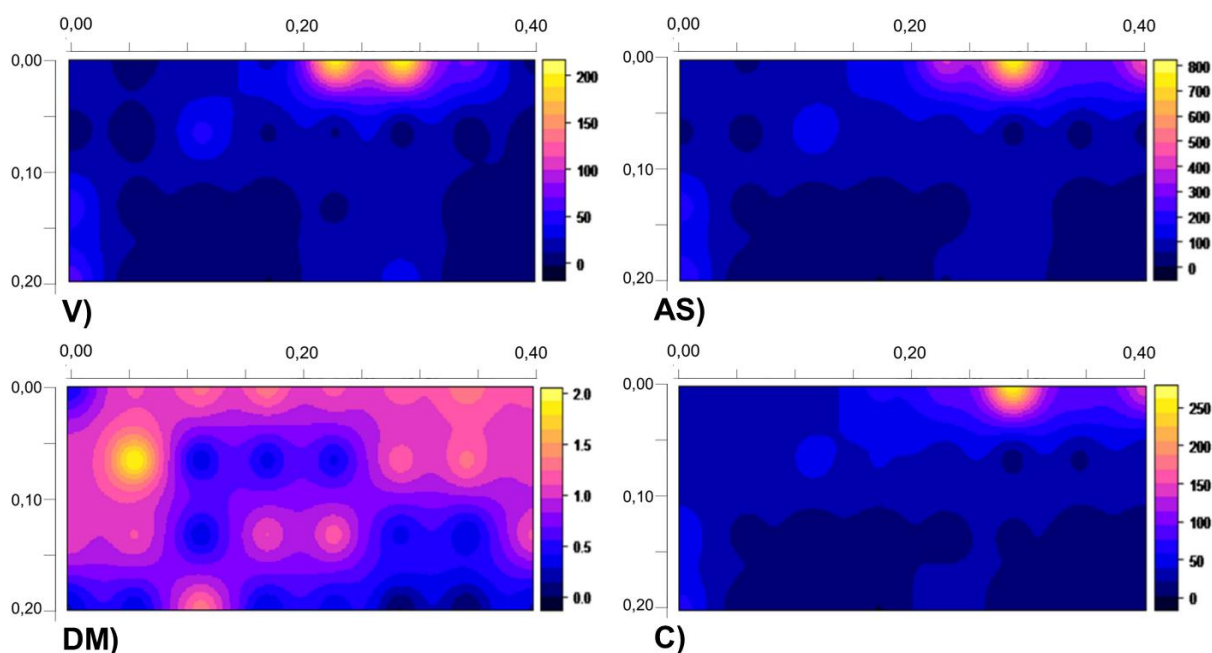


Figura 48 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso mata nativa (MN2), na associação de solo PVad7, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

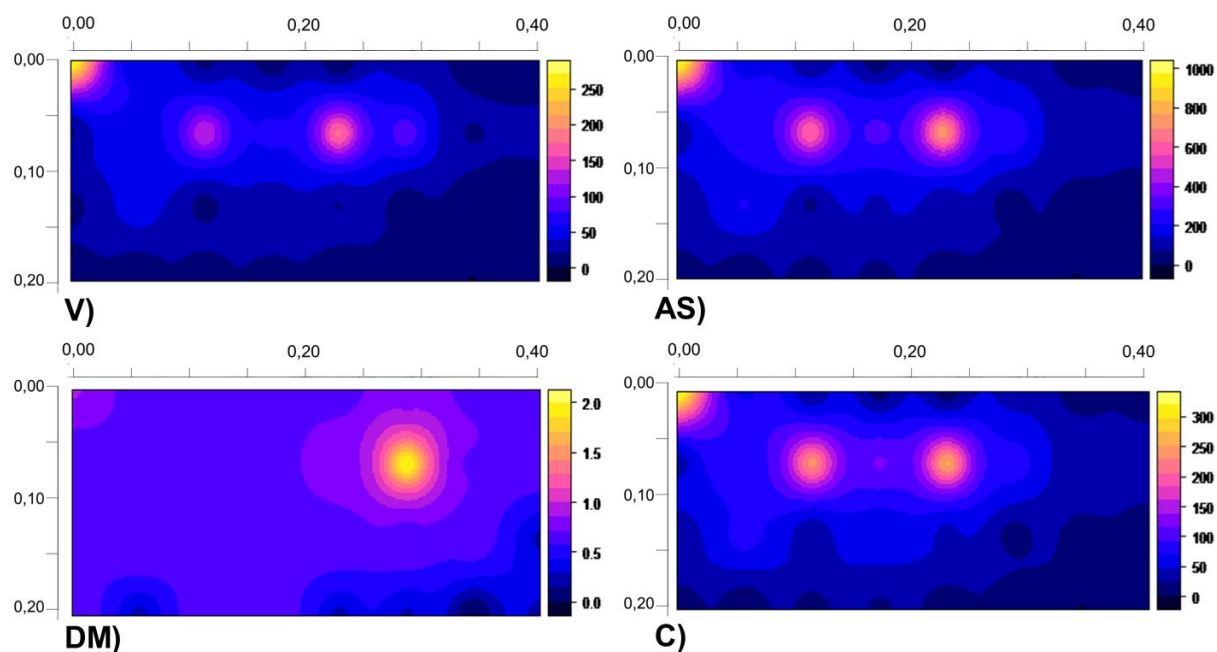


Figura 49 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso pastagem (PA1), na associação de solo RLd1, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

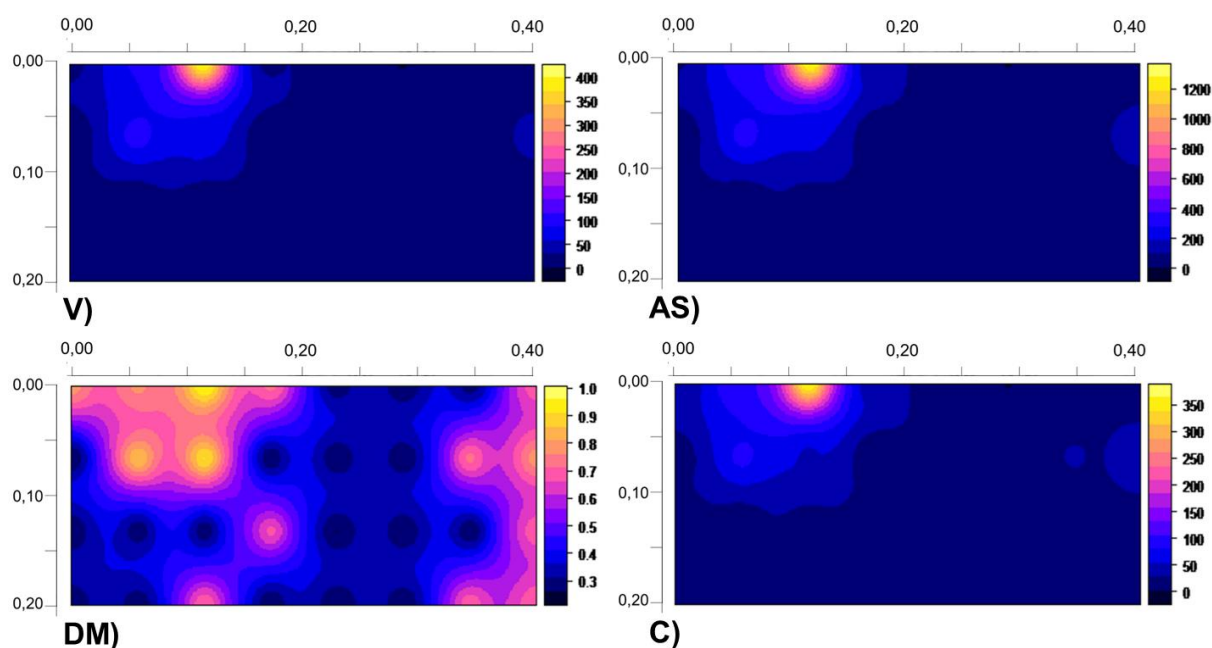


Figura 50 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso pastagem (PA2), na associação de solo RLd1, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

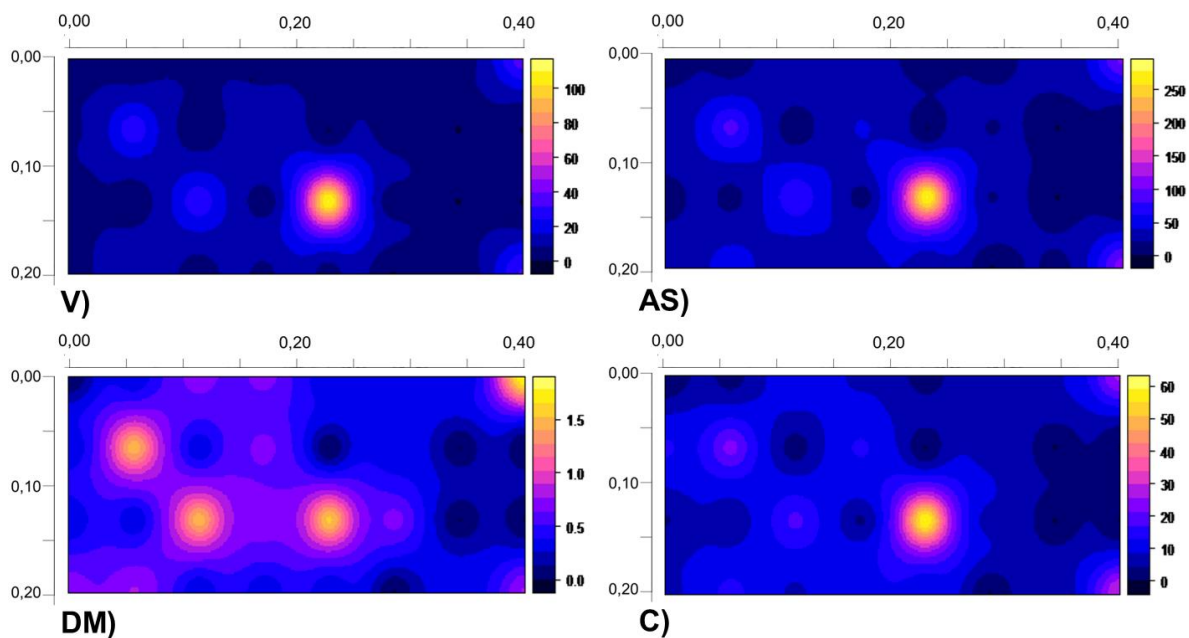


Figura 51 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso vegetação espontânea (VE1), na associação de solo RLd1, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

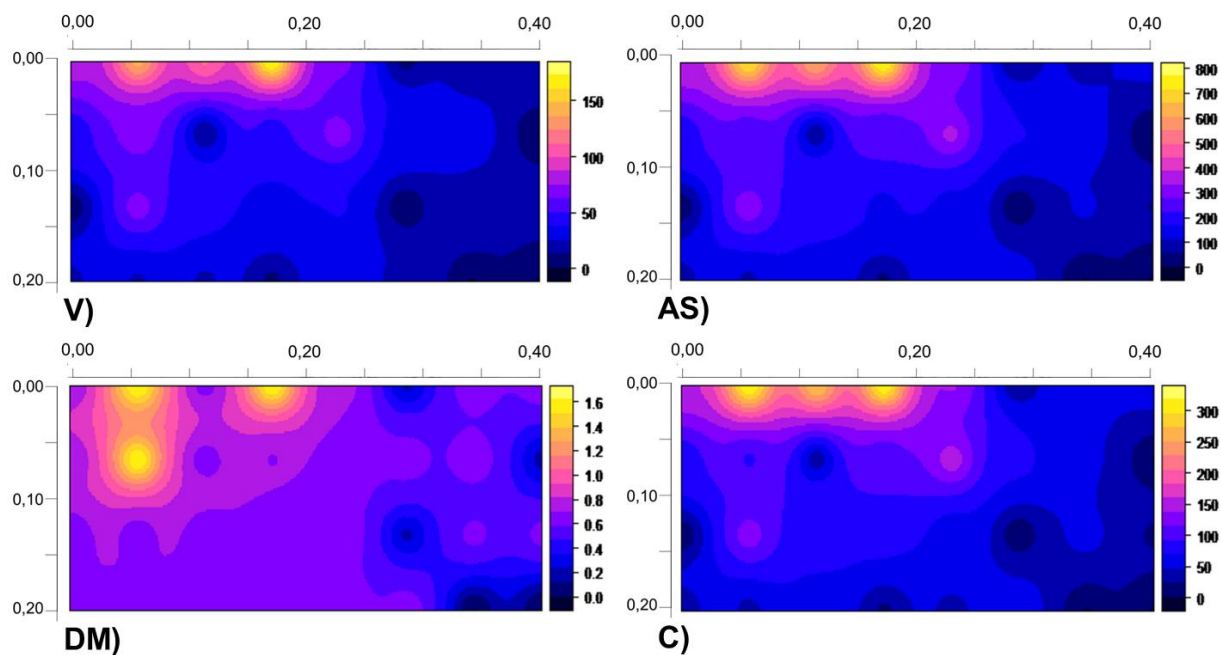


Figura 52 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso vegetação espontânea (VE2), na associação de solo RLd1, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

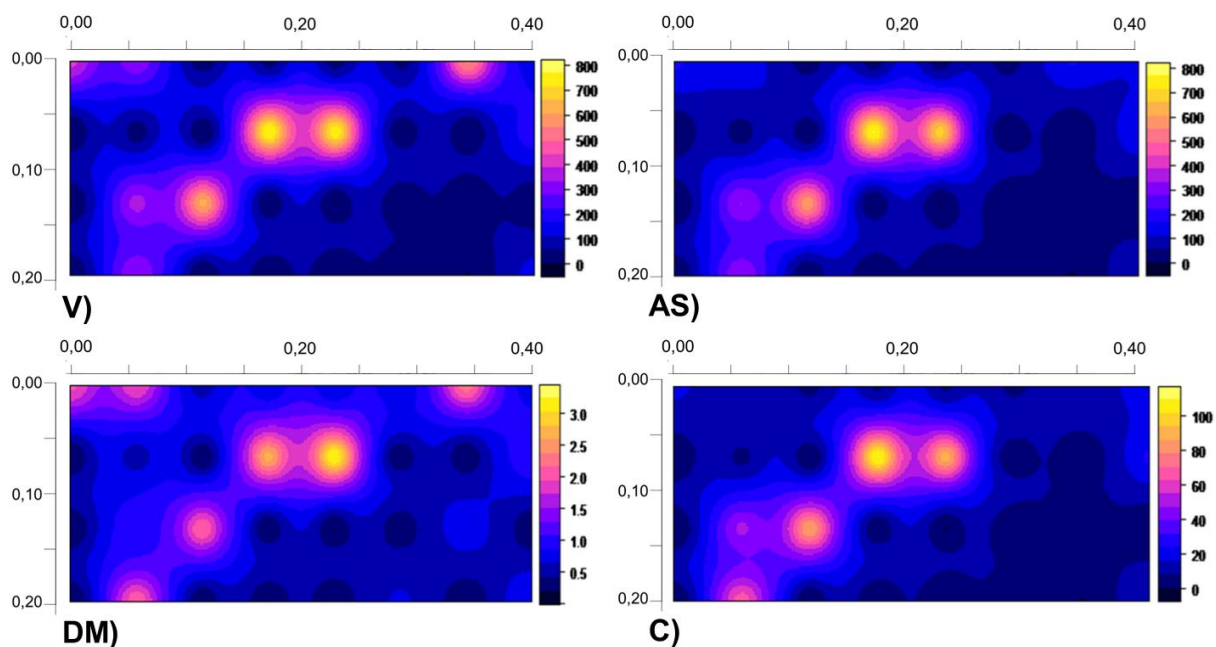


Figura 53 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso mata nativa (MN1), na associação de solo RLd1, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

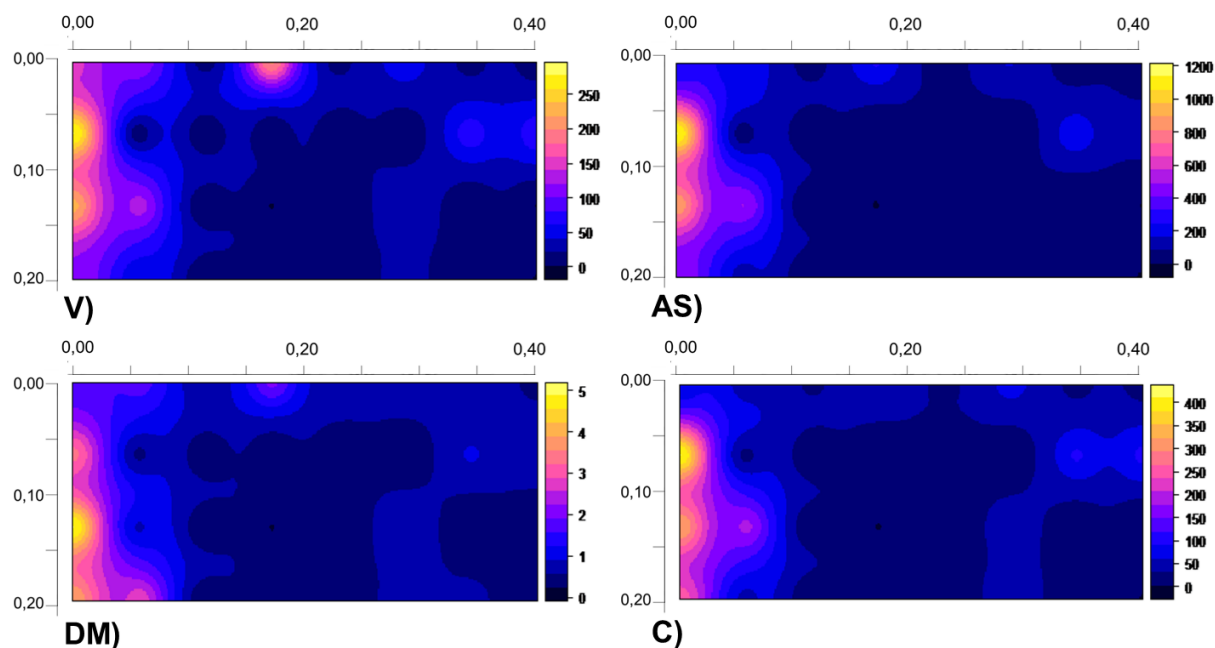


Figura 54 – Mapa da distribuição espacial do volume (V), da área superficial (AS), do diâmetro médio (DM), do comprimento (C) radicular, uso mata nativa (MN2), na associação de solo RLd1, da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

Essas análises reforçam que a variabilidade espacial do sistema radicular é regida por fatores internos a planta, e externos ao solo como teor de carbono, manejo, dentre outros, podendo ou não ocorrer de forma simultânea. Compreender a espacialização radicular permite alcançar o aproveitamento máximo dos recursos edáficos disponível para as culturas (LIMA et al., 2012).

Os dados revelam a viabilidade do uso da krigagem na avaliação da distribuição espacial de raízes. Permite identificar a localização e a abrangência dos valores extremos, o grau de homogeneidade da área e as direções de maior gradiente. Essas superfícies podem revelar se há algum padrão que sugira que a variável interpolada tenha correlação com outras variáveis, tais como compactação, classe, uso e manejo de solo.

Pesquisas a partir do processamento de imagens digitais 2D do sistema radicular no perfil de solo, destacam-se como promissoras e relevantes no contexto da conservação ambiental, pois, colaboram na interpretação dos efeitos dos sistemas de usos e manejos. Estudos adicionais poderão contribuir com relevantes questões sobre as distribuições de enraizamento de plantas, como: o desenvolvimento de um banco de dados de áreas nativas, a relação com

armazenamento de carbono, a recuperação de áreas degradadas com espécies nativas e heterogêneas, a fim de obter representações mais realistas dos processos solo-raízes.

CONCLUSÕES

Densidade, porosidade total, resistência à penetração, umidade gravimétrica, areia, argila, carbono orgânico total e diâmetro médio radicular apresentaram estrutura de dependência espacial indicando o modelo esférico com maior confiabilidade espacial.

O esquema amostral não foi suficiente para captar a dependência espacial da macro e microporosidade, do silte, do volume, área superficial e comprimento radicular dos cultivos indicando distribuição aleatória (efeito pepita puro) destes dados.

Volume, área superficial, diâmetro médio e comprimento apresentaram correlação negativa com a densidade e resistência à penetração do solo e positiva com a porosidade total e o teor de carbono orgânico total do solo.

Os mapas resultantes das interpolações (krigagem e IDW) mostraram-se relevantes para a visualização espacial das tendências e das interações entre os atributos físicos evidenciando contrastes entre os sistemas de usos (pastagem, vegetação espontânea e mata nativa).

7. REFERÊNCIAS

- AQUINO, R.E; CAMPOS, M.C; JUNIOR, J.M. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em Latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência Solo.** , v. 38, p. 397-406, 2014.
- ABREU, S.L; REICHERT, J.M; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v. 28, p. 519-531, 2004.
- ALVARENGA, M. I. N., PAULA, M. B. Planejamento conservacionista em microbacias. **Informe Agropecuário**, v. 21, n. 207, p. 55 - 64, 2000.
- 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, p. 711 – 728, 2013.
- ALVES, S. C. A água como elemento fundamental da paisagem em microbacias. **Informe Agropecuário**, v. 21, n. 207, p. 9 – 14, 2000.
- ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A. S.; SUZUKI, L. E. A. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo vermelho distrófico em recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p. 617-625, 2007.
- ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Uso do índice S na determinação da condutividade hidráulica não saturada de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.376-381, 2008.
- ARZENO, J.L; VIERA, S.R; SIQUEIRA, G.M; FILHO, O.G. Variabilidade espacial da resistência à penetração na superfície do solo em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v.9, n.3, p.343-352, 2014.
- AYRES, M., AYRES JÚNIOR, M., AYRES, D.L; SANTOS, A.A. 2007. BIOESTAT – Aplicações estatísticas nas áreas das ciências. Ong Mamiraua. Belém, PA.
- ARAÚJO, R.; GOEDERT, W.J.; LACERDA, M.P.C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1099-1108, 2007.
- BABAKHANI, M.; DEUTSCH, C. V. Standardized Pairwise Relative Variogram as a Robust Estimator of Spatial Structure. Paper 310, CCG Annual Report 14, 2012.
- BAQUERO, J.E.; RALISCH, R.; MEDINA, C.C.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M.F. Soil physical properties sand sugarcane root growth in a red oxissol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p. 63-70, 2012.
- BAYER, C. et al. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.677-683, 2004.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L.; ERNANI, P.R. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil. **Plant and Soil**, v.238, p.133-140, 2002.

BAVOSO, M.A.; GIAROLA, N.F.B.; TORMENA, C.A; PAULETTI, V. Preparo do solo em áreas de produção de grãos, silagem e pastejo: efeito na resistência tênsil e friabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.227-234, 2010.

BELTRAME, L. F. S.; TAYLOR, J. C. Causas e efeitos da compactação do solo. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v.33, p.59-62, 1980.

BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HANS, J.; MCKENNA, S.J.; ROBERTS, T.J; VALENTINE, T.A. Root responses to soil physical conditions: growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, p.437-477, 2006.

BEYER, F; HERTEL, D.; LEUSCHNER, C. Fine Root Morphological and Functional Traits in *Fagus sylvatica* and *Fraxinus excelsior* samplings as depends on species, root order and competition. **Plant and Soil**. V. 373, p.143-156, 2013.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R.L.M. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência e Solo**, p. 32:975-983, 2008.

BOHM, W. **Methods of studying root systems**. New York: Springer-Verlag, 1979.

BOCHNER, J.K. Serviços ambientais gerados pela floresta de mata Atlântica na qualidade do solo. Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, (monografia), 45p. 2007.

BOTTEGA, E.L; QUEIROZ, D.M; PINTO, F.A; SOUZA, C.M. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, p. 1-9, 2013.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The Nature and Properties of Soils**. 12th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2007, 980p.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO J. G. L.; MIERZWA J. C.; EIGER S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005, 317p.

BRASIL, F. C.; ZONTA, E.; OLIVEIRA, M. R. G. Métodos de amostragem e quantificação para estudos do sistema radicular em condições de campo - Uma revisão crítica. **Revista Ciência da Vida**, v.27, p.14-33, 2007.

BRYANT, R.B. et al. Cannonsville reservoir and town brook watersheds: documenting conservation efforts to protect New York City's drinking water. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.63, p.339-344, 2008.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. Trans. Am. Soc. Agron. Eng., 33:519-524, 1990.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 132p. 1997.

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p.777-783, 1992.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society American Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CAMPOS, M.C.C., RIBEIRO, M.R., SOUZA JÚNIOR, V.S., RIBEIRO FILHO, M.R., OLIVEIRA, I.A. Interferências dos pedoambientes nos atributos do solo em uma topossequência de transição Campos/Floresta. **Revista Ciência Agronômica**, v.41, p. 527-535, 2010.

CAMPOS, M. C.; SOARES, M.D.; SANTOS L. A.; OLIVEIRA I.A.; AQUINO, R. E.; BERGAMIN, A.C., Variabilidade espacial dos atributos físicos em um Argissolo Vermelho sob floresta, **Comunicata Scientiae**, v.4, p.168-178, 2013.

CARDUCCI, C.E; OLIVEIRA, G.C.; LIMA, J. M.; ROSSONI, D.F.; COSTA A.L.; OLIVEIRA, L.M. Distribuição espacial das raízes de cafeeiro e dos poros de dois Latossolos sob manejo conservacionista. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18,p.270–278, 2014.

CARNEIRO, M.A.C.; SOUZA, E.D.; REIS, E.F.; PEREIRA, H.S.; AZEVEDO, W.R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.147-157, 2009.

CARMO, F.F.; FIGUEIREDO, C.C.; RAMOS, L.M.G.; VIVALDI, L.J.; ARAUJO, L.G. Frações granulométricas da matéria orgânica em Latossolo sob plantio direto com gramíneas. **Bioscience Journal**, v.28, p. 420-431, 2012.

CHERUBIN, M. R.; EITELWEIN, M. T.; FABBRIS, C.; WEIRICH, S. W.; SILVA, R. F.; SILVA, V. R.; BASSO, C. J. Qualidade física, química e biológica de um Latossolo com diferentes manejos e fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.615-625, 2015.

CHRISTENSEN, B. T. Carbon in primary and secondary organomineral complexes. IN: CARTER, M. R.; STEWART, B. A. (Eds.). Structure and organic matter storage in agricultural soils. Boca Raton: CRC Lewis, p. 97-165, 1996.

CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria Orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.777-788, 2005.

COSTA, E.A.; GOEDERT, W.J.; SOUZA, D.M. Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.1185-1191, 2006.

COUTO, E.G.; KLAMT, E.; STEIN, A. Variabilidade espacial de propriedades do solo influenciadas pela agricultura, em escala regional. In: MEIRELLES, M. S. P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. (Eds). **Geomática, modelos e aplicações ambientais**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p.409-443, 2007.

CHOPART J.L.; SIBAND P. Development and validation of a model to describe root length density of maize from root counts on soil profiles. **Plant Soil**. v. 74, p, 214- 61. 1999.

CHRISTENSEN, B.T. Structure and organic matter storage in agricultural soils. In: CARTER, M.R.; STEWART, B.A. (Ed.). **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. Boca Raton, p.97-165. 1996

CHIG, L.A., COUTO, E.G., NOVAES FILHO, J.P., RODRIGUES, L.C.M., JOHNSON, M.S., WEBER, O.S. Distribuição espacial da granulometria, cor e carbono orgânico do solo ao longo de um transecto em microbacias na Amazônia meridional. **Acta Amazônica**, v.38, p.715–722, 2008.

COLOMBI, T; TOREES, L.C; WALTER, A. Keller, T. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. **Elsevier**, p.1026–1035, 2018.

CRESSIE, N. A. C.; HAWKINS, D. M. Robust estimation of the variogram. *Mathematical Geology*, New York, v. 12, p. 115-125, 1980.

CRESSIE N. A. C. *Statistics for spatial data*. New York: J. Wiley, 1993. 900 p.

CRESTANA, S.; GUIMARÃES, M.F.; JORGE, L.A.C.; RALISH, R.; TOZZI, C.L.; TORRE, A.; VAZ, C.M.P. Avaliação da distribuição de raízes no solo auxiliada por processamento de imagens digitais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, p.339, 1994.

CRUZ, J. S., JÚNIOR, R. N. A., MATIAS, S. S. R., TAMAYO, J. H. C., TAVARES, R. C. Análise espacial de atributos físicos - hídricos e carbono orgânico em Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 2, p. 271-278, 2010.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C. **Solos e Terras do Planalto Sul-Rio-Grandense e Planícies Costeiras**. EMBRAPACPACT (Documentos, 55/06). Pelotas, Ed. UFPel, p.43, 2006.

DEBIASI, H.; Franchini, J. C.; CONTE, O.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; TORRES, E.; SARAIVA, O. F.; OLIVEIRA, M. C.N. **Sistemas de preparo do solo: trinta anos de pesquisas na Embrapa Soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2013. 72 p. (Documentos. Embrapa Soja, 342).
<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/92107/1/Doc-342-OL.pdf>. 03 Mar. 2017.

DEDORDI, G.F. **Crescimento radicular da soja sob níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores**. 2015. 74 f. (Dissertação de Mestrado em

Agronomia), Programa de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

DE-POLLI, H.; PIMENTEL, M.S. Indicadores de qualidade do solo. In: AQUINO, A.M. de; ASSIS, R.L. de. (Ed.). *Processos biológicos no sistema solo-planta: ferramentas para uma agricultura sustentável*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2006.

DEXTER, A. R. Soil physical quality - Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v.120, p.201-214, 2004.

DIAS, L.E. **Uso de indicadores de qualidade de solo no monitoramento de processos de recuperação de áreas degradadas**. Boletim Informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.27, p.6-8, 2002.

DOWDY, R. H.; NATER, E. A.; DOLAN, M. S. Quantification of the length and diameter of root segments with public domain software. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.26, p.459-468, 1995.

DREWRY, J. J.; CAMERON, K. C.; BUCHAN, G. D. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing - a review. **Australian Journal of Soil Research**, v. 46, n. 3, p. 237-256, 2008.

EGUCHI, E.S.; SILVA, E.L; OLIVEIRA, M.S. **Variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas em um solo aluvial no Município de Lavras, MG**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, p.242-246, 2002.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2.ed. (Documento 132). Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, Brasília, Sistema de Produção de Informação, 306p. 2013.

EHLERS, W.; KÖPKE, U.; HESSE, F. & BÖHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil Tillage Research**, v. 3 p.261-275, 1983.

FELIX, V. B.; GONZATTO, O. A.; ROSSONI, D. F.; HENRIQUES, M. J. Estimadores de Semivariância: Uma Revisão. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 1157-1167, 2016.

FEPAM. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler. Mapa de Classificação dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul quanto à Resistência a Impactos Ambientais. Porto Alegre: FEPAM. 13 p. Relatório final de consultoria elaborado por Nestor Kämpf. Mapa em meio digital. 2001.

FERREIRA, M. M. I - **Caracterização Física do Solo**. In: LIER, Q. J. V. (Ed). Física do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010.

FIDALSKI, J.; ALVES, S. J.; Altura de pastejo de braquiária e carga animal limitada pelos atributos físicos do solo em sistema integração lavoura-pecuária com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.864 - 870, 2015.

FIGUEIREDO, C. C. de; RESCK, D. V. S.; CARNEIRO, M. A. C. Labile and stable fractions of soil organic matter under management systems and native cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 34, n. 3, p. 907-916, 2010.

FLAUZINO, B.K.; MELLONI, E.G.; PONS, A.D.; LIMA, O. Mapeamento da capacidade de uso da terra como contribuição ao planejamento de uso do solo em sub-bacia hidrográfica piloto no sul de minas gerais. **Geociências**, v. 35, p.277-287, 2016.

FLORES, J.P.C.; ANGHINONI, I.; CASSOL, L.C.; CARVALHO, P.C.F. de; LEITE, J.G.D.; FRAGA, T.I. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.771-780, 2007.

FONTANA, A. PEREIRA, M.G.; BERNINI, T.A.; ANJOS, L.H.; WADT, G.S; SANTOS, L.L. Compartimentos da Matéria Orgânica de Solos sob Floresta no Estado do Acre. **Floresta e Ambiente** v. 24, 2017;

FREDDI, O. da S.; CENTURION, J.F.; ALMEIDA, C.X. Compactação de um Latossolo Vermelho de textura argilosa afetando o sistema radicular e a produtividade do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.805-818, 2009.

FREITAS, L.; OLIVEIRA, I. A.; CASAGRANDE, J. C.; SILVA, L.S.; CAMPOS, M.C. Estoque de carbono de Latossolos em sistemas de manejo natural e alterado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, p. 228-239, 2018.

FROTA, P. V. **Potencial de Erosão na Bacia Hidrográfica do Açude Oros – CE**. 2012. 180 f. (Tese de Doutorado em Engenharia Florestal), Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, 2012.

GAITÁN, J.J., PENÓN, E.A., COSTA, M.C. Distribución de raíces finas de *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenii* y su relación con algunas propiedades del suelo. **Ciência Florestal** p. 33-41. 2005;

GLIŃSKI J, LIPIEC J, STĘPNIEWSKI W. **Plant roots and soil physical factors**. In: Encyclopedia of soil science, pp. 571–578, 2008.

GÓES, L.A.C. **Estatística: Uma abordagem decisória**. São Paulo: Saraiva, 1980. 428 p.

GOLCHIN, A.; OADES, J. M.; CLARKE, P. Soil structure and carbon cycling. **Australian Journal of Soil Research**, v.32, p.1043-1068, 1994.

GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais, Piracicaba: FEALQ, 305p. 2002.

GOMES, N.M., FARIA, M.A., SILVA, A.M., MELLO, C.R., VIOLA, M.R. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, p.427–435.2007.

GOMES, M. A. F.; FILIZOLA, H. F. Indicadores físicos e químicos de qualidade de solo de interesse agrícola. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente. 2006.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. 476p.

GOTWAY, C. A; HARTFORD, A. H. Geostatistical methods for incorporating auxiliary information in the prediction of spatial variables. **Journal Agricultural Biological Environmental Statistics** v.1, p.17-39, 1996.

GREGO, C.R.; Viera, S.R. Variabilidade Espacial e propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 169-177, 2015.

GUIMARÃES, W. D.; GRIPP JUNIOR, J.; MARQUES, E. A. G.; SANTOS, N. T.; FERNANDES, R. B. A. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos ocupados por pastagens. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, p. 247-255, 2016.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**. v.82, p.121-145, 2005

HAKANSSON , I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, v.16, p.105- 120, 1990.

HILLEL, D. **Solo e Água: Fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre: UFRGS, 231p. 1970.

HORST, W. J.; KAMH, M.; JIBRIN, J. M.; CHUDE, V. O. Agronomic measurements for increasing P availability to crops. **Plant and Soil**, Dordrecht, p. 211-233, 2001.

IORI, P.; SILVA, M.S.; SILVA, R.B; Resistência do solo à penetração e ao cisalhamento em diversos usos do solo em áreas de preservação permanente. **Bioscience Journal**, v.28, p.185-195, 2012.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

IZQUIERDO, I.; CARAVACA, F.; ALGUACIL, M.M.; HERNANDEZ, G.; ROLDAN, A. Use of microbiological indicators for evaluating success in soil restoration after revegetation of a mining area under subtropical conditions. **Applied Soil Ecology**, v.30, p.3-10, 2005.

JACKSON, R.B.; CANADEL, J.; EHLERINGER, J.R.; MOONEY, H.A.; SALA, O.E.; SCHULZE, E.D. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. **Oecologia**, v.108, p.389-411, 1996.

JORGE, L. A. C.; RODRIGUES, A. F. O. Safira: sistema de análise de fibras e raízes. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 20p. 2008. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 24).

JORGE, L.A.C; SILVA D.J.C; SAFIRA: Sistema de análise de fibras e raízes. São Carlos: **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, 2010.

JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, CH. J. **Mining geostatistics**. New York: Academic Press Inc., 1978. 600p.

KAESTNER, A.; SCHNEEBELI, M.; GRAF, F. Visualizing threedimensional root networks using computed tomography. **Geoderma**, v.136, p.459-469, 2006.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Editora Ceres, 1979. 264 p.

KOHN, L.F; CARDUCCI,C.E; SILVA, K.C; BARBOSA,J.C;3,. Desenvolvimento das raízes de linho (*linum usitatissimum* L.) em dois anos de cultivo sobre cambissolo húmico. **Revista Scientia Agraria**. p. 36-41, 2016.

KOPPEN, W. Climatologia com un estudio de los climas de la tierra. México: Fondo de Cultura Econômica, 1948. 478.

KLEIN, V. A. **Física do Solo**. 3ed. Passo fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2014. 263p.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: BLACK, C. A., ed. **Methods of Soil Analysis. I. Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, p.635-662. 1986.

KUNZ, M.; GONÇALVES, A.D.M.; REICHERT, J.M.; GUIMARÃES, R.M.L.; REINERT, D.J; RODRIGUES, M.F. Compactação do solo na integração soja-pecuária de leite em latossolo argiloso com semeadura direta e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.1699-1708, 2013.

LANZANOVA, M. E.; NICOLOSO, R. S.; LOVATO, T.; ELTZ, F. L. F.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1131-1140, 2007.

LAPEN, D. R.; TOPP, G. C.; GREGORICH, E. G.; CURNOW, W. E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil and Tillage Research**, 78:151-170, 2004.

LEÃO, T. P. Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem. Piracicaba: ESALQ/USP. Dissertação Mestrado. 58p. 2002.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:415-423, 2004.

LIBARDI, L.L.; Van LIER, Q. Atuação dos fatores físicos do solo no desenvolvimento do sistema radicular In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: METODOLOGIAS E ESTUDO DE CASOS, 1999, Aracajú/SE. **Anais.... EMBRAPA – Tabuleiros Costeiros**. 1999. p. 47-56.

LI D.; LAKE, L. W. A moving window semivariance estimator. *Water Resources Research*, Washington, v.30, n.5, p.1479-1490, 1994.

LIMA, C.E.P; FONTENELLE, M.R.; MADEIRA, N.R.; SILVA, J.; GUEDES, I.R.; SILVA, L.B.; SOARES, D.C.; Compartimentos de carbono orgânico em Latossolo cultivado com hortaliças sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.51, n.4, p.378-387, abr. 2016.

LIMA, C.G; CARVALHO, M.K; SOUZA, A; COSTA, N.R; MONTANARI, R. Influência de atributos químicos na erodibilidade e tolerância de perda de solo na bacia hidrográfica do baixo São José dos Dourados. **Geociências**, v. 35, p.63-76 , 2016.

LIMA, C. L. R.; PILLON, C. N.; LIMA, A. C. R. Qualidade Física do Solo: Indicadores Quantitativos. **Embrapa Clima Temperado, Pelotas. Documentos**, 196. 25p. 2007.

LIMA, V. M. P.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; CURI, N.; EVANGELISTA, A. R. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.71-78, 2012.

LIMA, C.L.R; PAIVA, R.B; NUNES, M.C; TUCHTENHAGEM, I.K; PILON, C.N; Critical values of physical attributes of na Ustisol under in South Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v.13, 5529, 2018.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, v.1, p.277-294, 1985

LOGSDON, S. D., PERFECT, E., TARQUIS, A. M. Multiscale Soil Investigations: Physical Concepts and Mathematical Techniques. **Vadose Zone Journal**, v. 7, n. 2, p. 453 - 455, 2008.

LOSS, A. Pereira, M.G.; Schultz, N.; ANJOS, L.H.C.; SILVA, E.M.R. Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção Orgânica. **Ciência Rural**, v.39, p.1077-1082, 2009.

LYNCH, J. P. Roots of the second green revolution. **Turner Review, Australian Journal of Botany**, v.55, p.493-512, 2007.

MACHADO, P.O. A. Fracionamento físico do solo por densidade e granulometria para a quantificação de compartimentos da matéria orgânica do solo: um procedimento para a estimativa pormenorizada do seqüestro de carbono pelo solo. Comunidade Técnico. **Embrapa solos, Rio janeiro**. 2002.

MARCOLAN, L. M.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um Argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.163-170, 2006.

MARUYIAMA, M. **Avaliação de comprimento e diâmetro radicular do milho por técnicas de processamento digital de imagens**. 2016. 115 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada) Universidade Estadual de Ponta Grossa (PR).

MATHERON, G. **Traité de géostatistique appliquée**. Paris: Technip, v. 14, 1962.

MAZURANA, M.; LEVIEN, R.; MÜLLER, J.; CONTE, O. Sistemas de preparo de solo: Alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1197-1206, 2011.

MAURICE J.; LACLAU J.P.; RE D.S.; MORAES J.L.; NOUVELLON Y.; BOUILLET J.P.; STAPE J.L.; RANGER J.; BEHLING M.; CHOPART J.L. Fine root isotopy in Eucalyptus grandis plantations. Towards the prediction of root length densities from root counts on trench walls. **Plant Soil** v.334 p.261-275, 2010.

MCGRAW, T. Soil test level variability in sout hern Minnesota. Better crops. **Potash & Phosphate Institute**, v.78, n.4, p.24-25, 1994.

MELLO IVO, W. M. P.; MIELNICZUK, J. Influência da estrutura do solo na distribuição e na morfologia do sistema radicular do milho sob três métodos de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.2, p.135-143, 1999.

MEROTTO JR, A., MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.197-202, 1999.

MEURER, E. J. **Fundamentos de Química do Solo**. 5ª Ed. Porto Alegre: Evangraf, 2012.

MONTANARI, R., ZAMBIANCO, E.C., CORRÊA, A.R., PELLIN, D.M.P., CARVALHO, M.P., DALCHIAVON, F.C. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho correlacionados linear e espacialmente com a consorciação de guandu com milheto. **Revista Ceres**,v.59, p.125-135, 2012.

MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; BETIOLI, JUNIOR E.; PETEAN, L. P.; ALVES, S.J. Influência da altura de pastejo de azevém e aveia em atributos físicos de um Latossolo vermelho distroférico, após sete anos sob integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1315-1326, 2014.

MOTTA, A. C. V.; NICK, J. A.; YORINORI, G. T.; SERRAT, B. M. Distribuição horizontal e vertical da fertilidade do solo e das raízes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cultivar Catuai. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.28, p.455-463, 2006.

MULLA, D. J.; McBRATNEY, A. B. **Soil spatial variability**. In: WARRICK, A. W. (Ed.). *Soil physics companion*. Boca Raton: CRC Press, 2002. p. 343- 373.

NAMBIAR, E.K.S.; SANDS, R., Effects of compaction and simulated root channels in the subsoil on root development, water uptake and growth of radiata pine. **Tree Physiology**, v.10, p.297-306, 1992.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R., (Ed.) **Methods of soil analysis**. Madison: ASA Inc., p. 539-579. 1982.

NETO, F.C; SAMPAIO, F.M; VELOSO, M.E; Variabilidade Espacial da Resistência à Penetração em Neossolo Litólico Degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v39, p.1353-1361, 2015.

NICODEMO, F. M. L., BORGES L.B., SOUZA, I.M. Atributos físicos do solo em quatro sistemas de uso da terra em São Carlos, SP. **Revista Brasileira Ciências Agrárias**, Recife, v.13, 5524, 2018.

NICOLOSO, R.S. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em áreas de integração lavoura-pecuária sob sistema de plantio direto**. 2005. 150f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria.

NIELSEN, D.R.; WENDROTH, O. **Spatial and temporal statistics: sampling field soils and their vegetation**. Reiskirchen: Catena Verlag, 398p. 2003.

KLEIN, V. A. **Física do Solo**. 3ed. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2014. 40p.

OLIVEIRA, L.M. **Relação entre atributos do solo aplicando a abordagem em Espaço de Estados em duas bacias hidrográficas na região Sul do Rio Grande do Sul**. 2015. 74 p. Dissertação (Mestrado Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água) - Universidade Federal de Pelotas (RS).

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; AQUINO, R. E.; MARQUES JUNIOR, J.; NASCIMENTO, E. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em um cambissolo háplico sob diferentes usos na região sul do amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 37, p. 1103-1112, 2013.

PAIVA, R.B **Qualidade Estrutural na Camada Superficial de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob Diferentes Usos**. 2016. 103 p. Dissertação (Mestrado Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água) - Universidade Federal de Pelotas (RS).

PANZIERA, W. **Espaçamentos entrelinhas em cultivo de cana-de-açúcar: parâmetros físicos do solo e componentes de rendimento**. 2018. 174 p. Tese (Doutorado Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água) - Universidade Federal de Pelotas (RS).

PAYA, A. M.; SILVERBERG, J. L.; PADGETT, J.; BAUERLE, T. L. X-ray computed tomography uncovers root–root interactions: quantifying spatial relationships between interacting root systems in three dimensions. **Plant and Science**, April 2015.

PAULINA, P.S. **Atributos Físicos Como Indicadores Da Qualidade Do Solo Em Sistemas De Manejo No Estado De Santa Catarina**. 2013. 95 p. Dissertação (Mestrado Programa de Pós-Graduação em Manejo do Solo da Água) - Universidade do Estado de Santa Catarina (SC).

PREFEITURA MUNICIPAL DE PELOTAS – **Plano Ambiental de Pelotas**. Disponível em: <http://www.pelotas.rs.gov.br/qualidade-ambiental/plano-municipal/> acessado em 27 de junho, 2016.

PIERRET, A.; DOUSSAN, C.; CAPOWIEZ, F.; BASTARDIE, L.; PAGES, L. **Root functional architecture: a framework for modeling the interplay between roots and soil.** *Vadose Zone Journal*, v.6, p.269-281, 2007.

PIERRET, A., DOUSSAN, C., GARRIGUES, E., AND KIRBY, J.M. Observing plant roots in their environment: current imaging options and perspectives. **Agronomie** 23: 471-479. 2003.

PRITCHETT WL. **Suelos foresatales: propiedades, conservación y mejoramient.** Noriega: Ed. Limusa; 1986.

QUINTO MH, MORENO HF, CAICEDO MHY, PEREZ LMTY. **Biomasa de raíces finas y fertilidad del suelo en bosques pluviales tropicales del Pacífico colombiano.** *Colombia Forestal* 19: 53-66, 2016.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistica Computing, Vienna, Austria, 2014.

RABOT, E.; WIESMEIER, M. SCHLÜTER, S.; VOGEL, H. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**. v. 314, p.122–13, 2018.

RASSE, D. P.; RUMPEL, C.; DIGNAC, M. F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 269, p. 341-356, 2005.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M., eds. **Tópicos em Ciência do Solo.** Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.5. p.49-134, 2007.

REICHARDT, K., TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: Conceitos, processos e aplicações.** 2ª edição, São Paulo: Ed. Manole, 2012, p. 524.

REICHARDT, K; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações.** 3.ed. Barueri: Manole, 2016. 547 p.

REIS, D. A.; LIMA, C.L.R; BAMBERG, A. L. Qualidade física e frações da matéria orgânica de um Planossolo sob sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, p.1623-1632. 2016.

RENA, A. B.; GUIMARAES, P. T. G. **Sistema radicular do cafeeiro: Estrutura, distribuição, atividade e fatores que o influenciam.** Belo Horizonte: EPAMIG, Documentos, v.37, 80p. 2000.

REZA, S,k, et al, Spatial distribution of soil physical properties of alluvial soils: a geostatistical approach, **Archives of Agronomy And Soil Science**, [s.l.], v, 62, n, 7, p,972-981, 3 nov, 2015.

RIBON, A. A.; TAVARES FILHO, J. **Models for the estimation of the physical quality of a Yellow Red Latosol (Oxisol) under pasture.** *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v.47, p.25-31, 2004.

ROBERTSON, G.P. GS+: **Geostatistic for the enviroment sciences** – GS+ user's guide version 5. Plainwell, Gamma Design Software. 200p. 2000.

ROSA FILHO, G., CARVALHO, M.P., MONTANARI, R., SILVA, J.M., SIQUEIRA, G.M., ZAMBIANCO, E.C. Variabilidade espacial de propriedades dendrométricas do eucalipto e de atributos físicos de um Latossolo Vermelho. **Bragantia**, v.70, p.439-446, 2011.

ROSOLEM, C. A.; VALE, L. S. R.; GRASSE, H. F.; MORAES, M. H. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.18, n.3, p.491-497, 1994.

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; BETTA, M.; POLIDORO, J. C. Frações húmicas da matéria orgânica do solo cultivado com soja sobre palhada de braquiária e sorgo. **Bragantia**, v. 70, p. 622-630, 2011.

ROSSIELLO, R.O.P.; ARAÚJO, A.P.; MANZATTO, C.V.; FERNANDES, M.S. Comparação dos métodos fotoelétricos e da interseção na determinação de área, comprimento e raio médio radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.30, p.633-639, 1995.

RUSSEL, R.S.; ELLIS, F.B. Estimation of the distribution of plant roots in soil. **Nature**, v.17, p.583-583, 1968.

RUSSEL, R. S.; GOSS, M.J. Physical aspects of soil fertility: the response of roots to the mechanical impedance. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, v.22, p.305-318, 1974.

SALTON, J.; TOMAZI, M. **Sistema radicular de plantas e qualidade do solo**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, Comunicado Técnico, 2014.

SANTOS, J. P. **Erosividade determinada por desagregação de chuva diária no lado brasileiro da Bacia da Lagoa Mirim**. Pelotas, 2013, 89p. Dissertação (Mestrado programa de pós-graduação em manejo e conservação do solo e da água) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2013.

SCHACHTMAN, D. P.; REID, R. J.; AYLING, S. M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. *Plant Physiology*, Rockville, v. 116, p. 147-153, 1998.

SHIAVO, J.A.; COLODRO, G. Agregação e resistência à penetração de um Latossolo Vermelho sob sistema de integração lavoura-pecuária. **Bragantia**, 2012.

SEIER, E. **Comparison of tests normality**. Tennessee: ETSU, 2002. 17 p. Disponível em: . Acesso em: jan. 2019

SHE, M.; QIAN, C.; TIMM, L.C.; BESKOW, S.; WEI, H.; CALDEIRA, T.L; OLIVEIRA, L.M. Multi-scale correlations between soil hydraulic properties and associated factors along a Brazilian watershed transect. **Geoderma**, v.286, p.15–24, 2017.

SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial da resistência à penetração de um latossolo vermelho-escuro ao longo de uma transeção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.13, p.1-5, 1989.

SILVA, L. M. V.; PASQUAL, A. Dinâmica e modelagem da matéria orgânica do solo com ênfase ao ecossistema tropical. **Energia na agricultura**, v.14, p.13-24, 1999.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.191-199, 2000.

SILVA, T.P. **Variabilidade espacial de atributos físicos e estimativa da erosão hídrica de solos na sub-bacia Micaela –RS**. 2018. 152 p. Dissertação (Mestrado Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água) - Universidade Federal de Pelotas (RS).

SILVEIRA, D. C.; MELO FILHO, J. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S.; SILVEIRA, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p. 659-667, 2010.

SISTI, C.P.J.; SANTOS, H.P.; KOHHAN, R.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil Tillage and Research, Amsterdam**, v.76, p.39-58, 2003.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v.79, p.7-31, 2004.

SORACCO, C.G.; LOZANO, L.A.; VILLARREAL, R.; PALANCAR, T.C.; COLLAZO, D.J.; SARLI, G.O; FILGUEIRA, R.R. Effects of compaction due to machinery traffic on soil pore configuration. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.408-415, 2015.

SOUZA, Z.M., MARQUES JUNIOR, J., PEREIRA, G.T., MONTANARI, R., CAMPOS, M.C.C. Amostragem de solo para determinação de atributos químicos e físicos em área com variação nas formas do relevo. **Revista Científica**, v.34, p. 249-256. 2006.

SOUZA, E.D; COSTA, S.E.V.G; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P.C.F; ANDRIGUETI, M. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1829-1836, 2009.

SOUZA, C.A.T. **Análise Crítica do Sistema de Macrodrenagem do Santa Bárbara – Pelotas/RS**. 2008. 84f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização programa de Pós-Graduação Curso Gestores Regionais de Recursos Hídricos) - Faculdade de Engenharia Agrícola Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS.

SOUZA, E.; FERNANDES FILHO, E.I.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BATJES, N.H.; SANTOS, G.R; PONTES, L.M. Pedotransfer functions to estimate bulk density from

soil properties and environmental covariates: Rio Doce basin. **Scientia Agricola**, v.73, p.525-534, 2016.

STOLF, R.; THURLER, A.M.; BACCHI, O.O.S; REICHARDT, K. Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.447-59, 2011.

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M; LIMA, C.L.R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.963-973, 2008.

TAVARES FILHO, J; RIBON, A.A. Resistência do solo a penetração em relação ao número de amostras e ao tipo de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32p. 487-494, 2008.

TAKEDA, Y. E. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo**. 2000. 87p. Tese (Doutorado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2000.

TEIXEIRA, L.; LA SCALA JÚNIOR, N.; LOPES, A. Fluxo de CO₂ do solo após aração e escarificação em diferentes condições. **Holos Environment**, v.10, p.1-11, 2010.

THOMASSON, A. J. Towards an objective classification of soil structure. **Journal of Soil Science**, v.29, p.38-46, 1978.

TORMENA, C.A.; VIDIGAL FILHO, P.S.; GONÇALVES, A.C.A.; ARAÚJO, M.A.; PINTRO, J.C. Influência de diferentes sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.8, p.65-71, 2004.

TORMENA CA, BARBOSA MC, COSTA ACS, GONÇALVES A.C.A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v.59, p.795-801, 2002.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.333-39, 1996.

TUCHTENHAGEM, I. **Variabilidade espacial de indicadores físicos e visuais da qualidade estrutural dos solos da sub-bacia Santa Rita, Pelotas/RS**. 2018. 105 p. Tese (Doutorado Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água) - Universidade Federal de Pelotas (RS).

VALADÃO, F.C. A; WEBER, O. L; JÚNIOR, D.D; SCAPINELLI, A; DEINA, F.R e BIANCHINI. Adubação fosfatada e compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.243-255, 2015.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.3, p.743-755, 2009.

VIANA, E. T.; BATISTA M. A.; TORMENA C. A.; COSTA A. C. S.; INOUE T. T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.2105-2114, 2011.

VIERA, S.R; HATFIELD, J.L; NIELSEN, D.R; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of agronomical properties. **Hilgardia**, v.51, p.1-75.1983.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo, In: Novais, R. F. et al. (Ed.) **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. v.1, p.1-53, 2000.

VIEIRA, S. R.; MILLETE, J. A.; TOPP, G. C.; REYNOLDS, W.D. Handbook for Geostatistical analysis of variability in soil and meteorological parameters, In: ALVAREZ, V. H. (Ed.) **Tópicos em Ciência do Solo 2**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.1-45, 2002.

VOORHEES, W.B. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.47, p.129- 133, 1983.

WANG, Y.Q.; SHAO, M.A.; LIU, Z.P; ZHANG, C.C. Prediction of bulk density of soils in the Loess Plateau Region of China. **Surveys in Geophysics**, v.35, p.395–413, 2014.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field, In: HILLEL, D. (Ed.) **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, p.319-344, 1980.

McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. How many observations are needed for regional estimation of soil properties? **Soil Science**, Baltimore, v. 135, n. 3, p. 177-183, 1983.

McBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal Soil Science**, p. 617-639, 1986.

WEBSTER, R; OLIVER, M. **Geostatistics for environmental scientists**. 2.ed. Chichester, John Wiley, 315p. 2007.

WENDLING, B.; VINHAL FREITAS, I.C.; OLIVEIRA, R.C.; BABATA, M.M.; BORGES, E.N. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. **Bioscience Journal**, v. 28, p. 256-265, 2012.

WILDING, L. P.; DRESS, L. R. Spatial variability and pedology and pedology. In: WILDING, L. P.; SMECK, N. E.; HALL, G. F. Pedogenesis and soil taxonomy: concepts and interactions. New York. 1983.

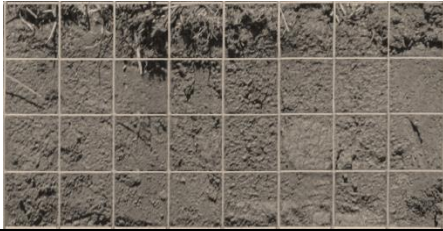
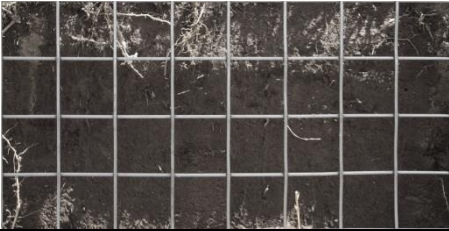
WILLIAMS, S.M; WEIL, R.R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Science Society American Journal**. v68, p. 1403-1409. 2004.

WILLAT, S.T.; STRUSS, R.G.; TAYLOR, H.M. In situ studies using neutron radiography. **Agronomy Journal**, v.70, p.581-586, 1978.

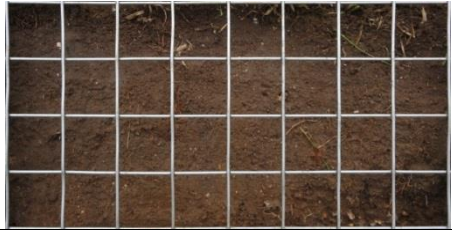
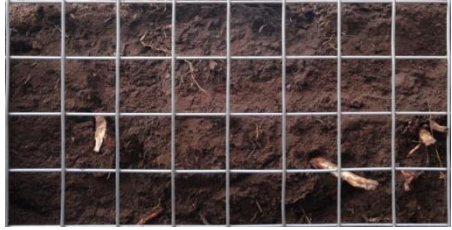
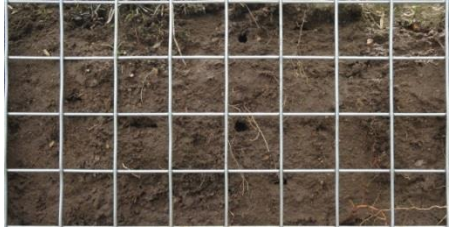
WOJCIECHOWSKI, J.C. **Geoestatística Aplicada ao Mapeamento de Atributos do Solo em uma Floresta Estacional Decidual**. 2006. 103 p. Dissertação (Mestrado Programa de Pós-Graduação em Geomática) - Universidade Federal de Santa Maria (RS).

ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G.; HUDSON, I. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. **Australian Journal Soil Research**, v.38, p.947-958, 2000.

Apêndice A – Fotos dos perfis de solo com gride de metal (quadro reticulado) com as dimensões 0,40 × 0,20 m. Tamanho da quadrícula: 0,05 x 0,05 m na transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS, na associação de solo SXe2, sob os usos Pastagem (PA), Vegetação Espontânea (VE) e Mata Nativa (MN) (Continuação).

Vegetações	Classes de solo Sex2 - Planossolo Háplico Eutrófico e Argissolo Acinzentado Eutrófico	
Pastagem (PA)		
Vegetação espontânea (VE)		
Mata Nativa (MN)		

Apêndice A – Fotos dos perfis de solo com gride de metal (quadro reticulado) com as dimensões 0,40 × 0,20 m. Tamanho da quadrícula: 0,05 x 0,05 m na transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS, na associação de solo PVad7, sob os usos Pastagem (PA), Vegetação Espontânea (VE) e Mata Nativa (MN) (Continuação).

Vegetações	Classes de solo	
	PVad7 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico e Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico	
Pastagem (PA)		
Vegetação espontânea (VE)		
Mata Nativa (MN)		

Apêndice A – Fotos dos perfis de solo com gride de metal (quadro reticulado) com as dimensões 0,40 × 0,20 m. Tamanho da quadrícula: 0,05 x 0,05 m na transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS, na associação de solo RLd1, sob os usos Pastagem (PA), Vegetação Espontânea (VE) e Mata Nativa (MN) (Continuação).

Vegetações	Classes de solo RLd1 - Neossolo Litólico distrófico e Argissolo Amarelo Distrófico	
Pastagem (PA)		
Vegetação espontânea (VE)		
Mata Nativa (MN)		

Apêndice B – Valores médios das variáveis areia, silte, argila, umidade gravimétrica (Ug) e densidade do solo (Ds) na camada **0,00 a 0,10 m**, Espaçamento amostral de 112 metros, na transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

Ponto	Classe de solo	AREIA	SILTE g,kg ¹	ARGILA	Ug g,g ¹	DS g,cm ³
1	SXe2	646,67	234,14	119,19	5,41	1,47
2		570,33	214,31	215,35	6,40	1,53
3		513,50	281,71	204,79	11,09	1,24
4		717,50	165,79	116,71	4,77	1,49
5		668,33	211,27	120,39	7,16	1,59
6		572,33	255,11	172,55	7,23	1,53
7		642,67	222,62	134,71	11,98	1,72
8		612,67	225,98	161,35	7,41	1,60
9		394,33	389,35	216,31	14,36	1,42
10		591,00	248,93	160,07	11,10	1,55
11		560,00	271,05	168,95	10,40	1,45
12		539,00	304,05	156,95	13,03	1,48
13		416,67	379,10	204,23	13,83	1,39
14		673,00	161,41	165,59	9,78	1,53
15		587,67	189,46	222,87	10,50	1,51
16		703,33	141,47	155,19	16,44	1,53
17		695,33	186,99	117,67	5,26	1,64
18		707,00	185,73	107,27	12,44	1,53
19		480,00	361,29	158,71	17,00	1,38
20		594,67	245,50	159,83	10,08	1,46
21		623,00	188,85	188,15	5,85	1,66
22		558,00	205,05	236,95	8,82	1,49
23		714,33	165,27	120,39	3,62	1,73
24	PVad7	642,33	227,03	130,63	6,12	1,60
25		670,00	206,41	123,59	3,50	1,47
26		661,33	223,55	115,11	5,00	1,59
27		633,67	205,38	160,95	6,81	1,69
28		581,67	189,86	228,47	6,28	1,52
29		622,33	178,79	198,87	9,96	1,62
30		623,67	206,10	170,23	5,78	1,48
31		616,67	187,18	196,15	11,88	1,51
32		653,00	194,45	152,55	10,65	1,59
33		679,33	184,11	136,55	11,24	1,73
34		617,33	227,55	155,11	10,30	1,65
35		667,67	177,78	154,55	8,36	1,56
36		636,33	195,99	167,67	11,39	1,51
37		630,67	208,86	160,47	10,22	1,43
38		685,00	175,33	139,67	8,49	1,60

Apêndice B – Valores médios das variáveis areia, silte, argila, umidade gravimétrica (Ug) e densidade do solo (Ds) na camada **0,00 a 0,10 m**, Espaçamento amostral de 112 metros na transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS. Continuação.

Pontos	Classe de solo	AREIA	SILTE g,kg ¹	ARGILA	Ug g,g ¹	DS g,cm ³
39	SXe2	628,67	225,26	146,07	10,88	1,54
40		646,00	183,13	170,87	8,36	1,65
41		603,67	247,54	148,79	9,63	1,44
42		636,67	219,10	144,23	8,56	1,48
43		700,33	200,87	98,79	10,04	1,36
44		668,67	217,02	114,31	8,96	1,51
45		517,67	192,82	289,51	9,77	1,22
46		679,33	132,43	188,23	12,06	1,49
47	PVad7	505,67	274,02	220,31	15,16	1,06
48		687,00	189,09	123,91	15,63	1,25
49		695,33	179,07	125,59	14,42	1,39
50		610,00	259,13	130,87	13,03	1,74
51		598,33	240,95	160,71	9,65	1,33
52		591,00	245,97	163,03	6,20	1,28
53		714,33	198,63	87,03	15,25	1,33
54		695,67	211,62	92,71	5,96	1,40
55		529,00	286,85	184,15	13,08	1,02
56		618,67	237,02	144,31	6,47	1,32
57		566,00	212,81	221,19	4,56	1,74
58		499,00	165,73	335,27	6,72	1,50
59		310,00	170,81	519,19	8,66	1,20
60		508,67	314,22	177,11	9,66	1,38
61		541,67	238,90	219,43	11,08	1,36
62		380,00	214,41	405,59	29,74	1,01
63		365,67	218,58	415,75	11,54	1,09
64		440,00	226,57	333,43	12,23	1,17
65		594,33	198,71	206,95	9,81	1,26
66		566,00	182,49	251,51	10,00	1,26
67		512,33	208,79	278,87	10,80	1,40
68		495,00	219,97	285,03	10,09	1,41
69		508,33	280,55	211,11	9,06	1,51
70		630,33	208,55	161,11	12,59	1,41
71		654,67	211,58	133,75	5,27	1,43
72		676,33	211,75	111,91	3,33	1,67
73		649,33	212,59	138,07	28,80	1,44

Apêndice B – Valores médios das variáveis areia, silte, argila, umidade gravimétrica (Ug) e densidade do solo (Ds) na camada **0,00 a 0,10 m**, Espaçamento amostral de 112 metros, na transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS. Continuação.

Pontos	Classe de solo	AREIA	SILTE g,kg ¹	ARGILA	Ug g,g ¹	DS g,cm ³
74	PVad7	564,67	273,66	161,67	8,56	1,45
75		599,00	197,73	203,27	8,44	1,43
76		679,67	161,54	158,79	8,05	1,36
77		617,00	210,13	172,87	8,92	1,47
78		603,33	207,87	188,79	10,73	1,31
79		639,00	210,37	150,63	6,95	1,56
80		734,33	155,11	110,55	4,13	1,36
81		608,33	214,55	177,11	12,89	1,26
82		391,67	139,38	468,95	12,44	1,28
83		651,33	199,63	149,03	7,63	1,37
84		612,33	218,39	169,27	4,09	1,44
85		568,67	239,66	191,67	5,28	1,67
86		640,33	234,71	124,95	5,42	1,24
87	PAd4	647,00	215,81	137,19	10,49	1,43
88	RLd1	592,33	234,55	173,11	6,24	0,86
89		682,67	159,50	157,83	3,89	1,13
90		541,33	258,43	200,23	8,14	1,20
91		582,00	200,97	217,03	5,96	1,17
92		512,67	278,06	209,27	9,57	0,98
93		504,00	352,81	143,19	5,85	1,07
94		534,33	307,91	157,75	9,43	1,35
95		554,67	300,86	144,47	5,75	1,08
96		667,67	223,14	109,19	5,64	1,35
97		821,67	131,14	47,19	2,31	1,18
98		512,67	266,30	221,03	11,67	1,14
99		318,33	424,15	257,51	15,09	1,19
100		608,00	213,93	178,07	6,49	0,96
101		613,00	194,61	192,39	5,09	0,84

Apêndice C – Valores médios das variáveis porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), resistência a penetração (RP) e carbono orgânico total (COT) na camada **0,00 a 0,10 m**, Espaçamento amostral de 112 metros, na transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

Pontos	Classe de solo	PT %	Ma %	Mi %	RP Mpa	COT g,kg ¹
1	SXe2	41,45	12,15	29,30	1,33	10,40
2		42,01	11,79	30,22	1,31	19,00
3		51,02	11,80	39,22	1,08	24,80
4		45,75	26,29	19,43	1,28	25,20
5		39,20	9,04	30,16	1,87	10,30
6		35,66	6,99	28,97	1,70	12,10
7		31,06	2,02	29,04	3,93	14,90
8		25,18	3,31	21,88	3,21	10,00
9		43,34	5,98	37,36	2,09	15,40
10		35,76	3,36	32,40	3,12	14,50
11		35,99	3,01	32,98	3,09	21,90
12		41,42	6,15	35,27	2,65	17,90
13		50,40	4,04	46,36	2,31	15,80
14		37,06	5,69	31,37	2,75	13,30
15		36,14	4,66	31,46	2,71	20,10
16		36,48	10,85	25,63	1,59	15,80
17		30,67	4,52	26,15	3,18	12,10
18		36,96	6,97	29,99	2,21	28,10
19		45,29	2,98	42,31	2,26	27,00
20		33,91	6,15	27,75	1,90	17,90
21		33,91	6,15	27,75	2,31	20,80
22		42,44	8,32	34,12	1,73	16,50
23		42,29	18,49	23,81	1,84	15,20
24	PVad7	38,55	10,66	27,90	2,08	16,20
25		40,29	14,40	25,89	1,73	20,80
26		40,86	15,73	25,13	1,80	16,50
27		36,37	9,63	26,74	2,19	19,70
28		44,34	12,29	32,05	1,98	22,50
29		46,74	17,08	29,65	1,93	18,30
30		40,11	12,20	27,91	2,13	15,10
31		41,23	8,52	32,70	2,22	21,90
32		38,88	6,69	32,19	2,33	16,40
33		34,87	6,96	27,90	3,60	8,20
34		34,88	4,37	30,51	2,77	15,90
35		36,76	9,30	27,46	2,51	17,40
36		37,32	6,06	31,26	2,15	17,50
37		40,05	7,14	32,91	2,17	18,20
38		38,62	6,78	31,84	2,66	16,50

Apêndice C – Valores médios das variáveis porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), resistência a penetração (RP) e carbono orgânico total (COT) na camada **0,00 a 0,10 m**, na transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS. Espaçamento amostral de 112 metros. Continuação.

Pontos	Classe de solo	PT %	Ma %	Mi %	RP Mpa	COT g,kg ¹
39	SXe2	39,87	6,85	33,03	2,50	19,90
40		45,69	12,53	33,16	2,09	18,10
41		36,26	5,68	30,58	2,08	18,00
42		43,69	8,94	34,75	2,36	18,40
43		41,80	14,10	27,70	2,73	15,80
44		34,82	4,01	30,81	2,65	16,60
45		47,01	8,78	38,23	1,91	20,90
46		49,30	11,73	35,57	2,03	20,80
47	PVad7	56,47	7,77	48,69	1,41	22,50
48		44,57	14,08	30,49	1,69	20,60
49		40,79	6,29	34,50	1,90	22,00
50		36,03	5,47	30,56	2,69	17,10
51		39,41	4,56	34,85	1,84	16,10
52		45,37	19,37	25,99	1,63	23,00
53		41,52	20,01	21,51	1,75	15,60
54		39,07	13,43	25,63	1,64	16,10
55		51,56	15,09	36,47	1,57	17,90
56		46,42	18,47	27,95	1,79	15,50
57		37,08	6,91	30,17	2,38	20,10
58		38,86	9,44	29,42	1,83	20,90
59		53,12	12,93	40,19	1,66	22,80
60		50,01	10,98	39,03	1,73	26,40
61		44,01	8,34	35,67	2,17	18,30
62		45,88	14,34	31,54	1,64	23,80
63		50,42	18,81	31,61	1,08	32,40
64		47,12	14,07	33,05	1,64	25,30
65		44,03	15,06	28,97	1,78	21,10
66		44,70	15,46	29,24	1,79	21,50
67		40,71	6,44	34,27	2,12	23,20
68		46,03	13,63	32,40	1,29	24,90
69		42,74	9,28	33,46	2,52	22,30
70		45,58	12,44	33,14	2,21	23,50
71		42,91	11,99	30,92	1,38	18,70
72		36,35	8,87	27,48	2,66	14,20
73		44,91	9,54	35,37	2,22	22,70

Apêndice C – Valores médios das variáveis porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), resistência a penetração (RP) e carbono orgânico total (COT) na camada **0,00 a 0,10 m**, Espaçamento amostral de 112 metros, na transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS. Continuação.

Pontos	Classe de solo	PT %	Ma %	Mi %	RP Mpa	COT g,kg ¹
74	PVad7	45,78	6,85	38,93	2,51	25,90
75		45,71	8,11	37,61	2,30	25,00
76		46,00	14,22	31,78	2,10	10,10
77		43,49	10,49	33,00	2,23	18,50
78		47,92	9,69	38,23	2,18	26,80
79		39,31	10,76	28,56	1,90	17,70
80		49,12	19,18	29,94	1,72	26,20
81		47,97	16,91	31,06	1,72	18,30
82		46,02	9,31	36,71	2,22	21,60
83		54,16	28,28	25,88	1,47	26,40
84		40,02	10,78	29,24	1,96	25,80
85		36,30	7,76	28,54	2,46	18,80
86		52,35	20,62	31,73	1,63	21,60
87	PAd4	45,49	16,44	29,05	1,98	18,80
88	RLd1	62,36	23,64	38,72	1,18	32,20
89		28,04	8,20	19,69	1,36	27,60
90		51,11	19,69	31,42	1,05	23,10
91		49,72	19,37	30,34	1,15	21,10
92		59,11	21,07	38,04	0,97	22,80
93		53,32	21,01	32,31	1,14	33,50
94		42,73	9,30	33,43	1,99	25,90
95		57,09	21,42	35,68	1,10	18,30
96		46,94	13,65	33,29	2,16	13,40
97		50,76	26,44	24,32	0,73	23,40
98		53,23	18,36	34,88	1,35	23,50
99		61,80	11,68	50,12	1,85	26,40
100		58,24	25,21	33,03	0,79	32,80
101		56,90	29,48	27,42	0,62	28,50

Apêndice D – Valores médios das variáveis areia, silte, argila e densidade do solo (Ds) nas camadas **0,00 a 0,10m e 0,10 a 0,20m**, dos perfis de solo, na transecção da sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

Classe de solo	Uso	Camada	AREIA	SILTE g.kg ¹	ARGILA	DS g.cm ³
SXe2	PA	0,00-0,10	649,00	217,33	133,67	1,62
		0,10-0,20	647,94	182,93	169,14	1,71
	VE	0,00-0,10	622,67	208,26	169,07	1,53
		0,10-0,20	566,49	249,79	183,73	1,69
	MN	0,00-0,10	580,08	257,92	161,99	1,35
		0,10-0,20	550,44	268,20	181,36	1,36
PVad7	PA	0,00-0,10	646,00	216,21	137,79	1,74
		0,10-0,20	645,86	184,50	169,64	1,51
	VE	0,00-0,10	618,50	208,99	172,51	1,37
		0,10-0,20	566,65	191,08	242,27	1,51
	MN	0,00-0,10	624,83	220,29	154,87	1,35
		0,10-0,20	502,21	199,65	298,15	1,38
RLd1	PA	0,00-0,10	558,17	254,44	187,39	1,26
		0,10-0,20	662,36	191,60	146,04	1,54
	VE	0,00-0,10	675,17	191,32	133,51	1,24
		0,10-0,20	647,34	194,27	158,39	1,51
	MN	0,00-0,10	610,50	204,27	185,23	0,90
		0,10-0,20	535,87	301,76	162,37	1,32

Apêndice E – Valores médios das variáveis porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), resistência a penetração (RP) e carbono orgânico total (COT) nas camadas **0,00 a 0,10m e 0,10 a 0,20m**, dos perfis de solo, na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

Classe de solo	Uso	Camada	PT	Ma %	Mi	RP MPa	COT g.kg ¹
SXe2	PA	0,00-0,10	34,01	4,49	29,52	3,07	21,65
		0,10-0,20	34,76	7,25	27,50	3,15	7,71
	VE	0,00-0,10	36,51	6,34	30,17	1,93	17,70
		0,10-0,20	32,18	6,72	25,46	2,22	10,00
	MN	0,00-0,10	46,23	11,97	34,26	1,20	24,80
		0,10-0,20	45,21	10,85	34,36	1,21	19,55
PVad7	PA	0,00-0,10	34,56	6,42	27,94	3,56	17,35
		0,10-0,20	40,45	11,43	29,02	1,98	8,18
	VE	0,00-0,10	42,40	7,31	35,09	2,03	20,15
		0,10-0,20	38,56	8,32	30,24	2,21	9,49
	MN	0,00-0,10	46,78	16,42	30,36	1,65	21,25
		0,10-0,20	46,37	15,13	31,24	1,71	16,36
RLd1	PA	0,00-0,10	46,21	14,33	31,88	1,57	23,5
		0,10-0,20	39,40	12,28	27,12	2,36	15,35
	VE	0,00-0,10	37,41	10,92	26,49	1,76	20,50
		0,10-0,20	41,12	10,25	30,87	2,27	15,93
	MN	0,00-0,10	57,57	27,34	30,23	0,71	30,65
		0,10-0,20	53,65	19,41	34,24	1,34	18,11

Apêndice F – Valores totais dos atributos volume (V), área superficial (AS), diâmetro médio (DM) e comprimento (C) radicular nas camadas **0,00 a 0,10m e 0,10 a 0,20m**, dos perfis de solo, na sub-bacia hidrográfica Micaela, Pelotas-RS.

Solo	Usos	Camada (m)	V (mm ³)	AS (mm ²)	DM (mm)	C (mm)
SXe2	PA1	0,00 - 0,10	135,89	557,84	0,39	207,95
		0,10 - 0,20	96,16	408,72	0,38	167,66
	PA2	0,00 - 0,10	501,77	1908,81	0,83	627,84
		0,10 - 0,20	114,49	369,95	0,43	117,09
	VE1	0,00 - 0,10	903,46	2350,88	0,90	607,66
		0,10 - 0,20	69,67	306,22	1,11	109,85
	VE2	0,00 - 0,10	460,25	1031,27	1,30	355,30
		0,10 - 0,20	218,35	740,56	1,29	312,19
	MN1	0,00 - 0,10	2185,69	4901,05	1,83	1670,13
		0,10 - 0,20	960,14	1803,84	1,09	751,90
	MN2	0,00 - 0,10	1653,02	6064,78	1,11	2326,49
		0,10 - 0,20	595,42	1766,79	0,81	627,85
PVad7	PA1	0,00 - 0,10	88,88	429,75	0,40	167,69
		0,10 - 0,20	129,32	475,97	0,40	155,15
	PA2	0,00 - 0,10	48,70	233,62	0,36	93,74
		0,10 - 0,20	185,13	791,34	0,52	285,82
	VE1	0,00 - 0,10	423,29	1382,66	0,78	423,92
		0,10 - 0,20	177,47	790,02	0,44	289,42
	VE2	0,00 - 0,10	217,00	794,00	0,68	253,43
		0,10 - 0,20	320,94	1144,00	0,71	370,18
	MN1	0,00 - 0,10	367,19	1564,39	0,68	551,56
		0,10 - 0,20	4465,65	5050,21	1,39	952,82
	MN2	0,00 - 0,10	548,14	2342,05	1,45	855,60
		0,10 - 0,20	660,86	2959,35	0,94	1081,93
RLd1	PA1	0,00 - 0,10	951,58	3830,67	0,77	1358,50
		0,10 - 0,20	164,42	781,94	0,49	304,16
	PA2	0,00 - 0,10	789,41	2662,94	0,57	797,26
		0,10 - 0,20	82,63	381,02	0,41	142,19
	VE1	0,00 - 0,10	107,11	384,63	0,45	120,95
		0,10 - 0,20	221,41	679,30	0,52	183,12
	VE2	0,00 - 0,10	925,04	4431,83	0,79	1902,20
		0,10 - 0,20	349,80	1604,95	0,53	653,27
	MN1	0,00 - 0,10	213,81	937,52	0,79	333,40
		0,10 - 0,20	1278,72	2146,52	1,52	1048,18
	MN2	0,00 - 0,10	429,99	2193,32	1,02	770,86
		0,10 - 0,20	1299,12	4799,26	1,86	1119,66