

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

Renan Storto Nalin

**USO DE COVARIÁVEIS AMBIENTAIS NA PREDIÇÃO DA VARIAÇÃO
ESPACIAL DO TEOR DE FÓSFORO DISPONÍVEL EM ÁREA AGRÍCOLA DO
SUL DO BRASIL**

Santa Maria, RS, Brasil

2021

Renan Storto Nalin

**USO DE COVARIÁVEIS AMBIENTAIS NA PREDIÇÃO DA VARIAÇÃO
ESPACIAL DO TEOR DE FÓSFORO DISPONÍVEL EM ÁREA AGRÍCOLA DO
SUL DO BRASIL**

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

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Simão Diniz Dalmolin

Santa Maria, RS, Brasil

2021

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

Nalin, Renan Storto
USO DE COVARIÁVEIS AMBIENTAIS NA PREDIÇÃO DA VARIAÇÃO
ESPACIAL DO TEOR DE FÓSFORO DISPONÍVEL EM ÁREA AGRÍCOLA
DO SUL DO BRASIL / Renan Storto Nalin.- 2021.
63 p.; 30 cm

Orientador: Ricardo Simão Diniz Dalmolin
Coorientador: Ricardo Bergamo Schenato
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2021

1. Mapeamento Digital do Solo 2. Fósforo Disponível 3.
Susceptibilidade Magnética I. Dalmolin, Ricardo Simão
Diniz II. Schenato, Ricardo Bergamo III. Título.

Renan Storto Nalin

**USO DE COVARIÁVEIS AMBIENTAIS NA PREDIÇÃO DA VARIAÇÃO
ESPACIAL DO TEOR DE FÓSFORO DISPONÍVEL EM ÁREA AGRÍCOLA DO
SUL DO BRASIL**

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


Aprovado em 28 de setembro de 2021



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



Fabrício de Araújo Pedron, Dr. (UFSM)



Jean Michel Moura Bueno Dr. (UNICRUZ)

Santa Maria, RS, Brasil
2021

AGRADECIMENTOS

À Deus, por sempre me guiar e iluminar o meu caminho.

Aos meus pais Julio Cesar Hernandez Nalin e Rosana Margarete Storto Nalin, por me educarem, me ensinarem seus valores e princípios, por sempre me apoiarem nos momentos mais difíceis, e independente das minhas escolhas e caminho que devesse seguir, sempre prezaram pela minha felicidade.

Agradeço aos meus irmãos Rafael e Rodrigo, por me proporcionarem momentos alegres, e por estarem ao meu lado também nos momentos tristes.

Ao meu orientador e amigo, professor Ricardo Dalmolin, pela confiança e paciência depositada em mim nestes dois anos e seis meses, agradeço também por todo conhecimento e experiência compartilhada.

Aos professores da banca Prof. Fabricio de Araújo Pedron e Prof. Jean Michel Moura Bueno pela disponibilidade, pelos momentos de discussão e amizade, pelos conselhos e auxílios que sempre precisei, em momento algum recusaram me ajudar, mesmo quando estavam extremamente ocupados. Além de professores, são grandes amigos que carregarei comigo, saibam que podem contar comigo.

Aos meus melhores colegas e também amigos, Matheus Flesch Soligo e Higor Machado, pela parceria durante a trajetória e por todos os momentos de confraternização.

A doutoranda e amiga Taciara Horst Heinen, pela indispensável ajuda durante a execução desta dissertação e pelos inúmeros conselhos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria, pela oportunidade de crescimento profissional.

A Capes, pela concessão da bolsa de estudos.

A todos(as) meu muito obrigado!

RESUMO

USO DE COVARIÁVEIS AMBIENTAIS NA PREDIÇÃO DA VARIAÇÃO ESPACIAL DO TEOR DE FÓSFORO DISPONÍVEL EM ÁREA AGRÍCOLA DO SUL DO BRASIL

AUTOR: Renan Storto Nalin

ORIENTADOR: Ricardo Simão Diniz Dalmolin

A demanda por mapas mais acurados de propriedades do solo, tem se tornado crescente na agricultura, especialmente visando o uso racional e eficiente da adubação fosfatada, que, quando mal manejada, pode acarretar em sérios danos ambientais, como a eutrofização de corpos d'água. Considerando esta necessidade, o objetivo deste trabalho foi avaliar a acurácia da predição espacial do teor de fósforo disponível do solo, ao calibrar diferentes modelos que combinem covariáveis do solo, junto as topográficas, em uma área agrícola na região Sul do Brasil. O estudo foi desenvolvido em uma propriedade rural de 162 ha, localizada no município de Tupanciretã, estado do Rio Grande do Sul (RS), Brasil. Foram coletadas amostras de solo na camada de 0-10 cm, com uma densidade de 1 ponto por ha. Com base nas análises físico-químicas e susceptibilidade magnética das 162 amostras, foram geradas nove covariáveis do solo por meio de Krigagem Ordinária (OK). Um modelo digital de elevação (MDE) com resolução de 12 m foi utilizado para derivar outras 13 covariáveis do terreno. O método *random forest* (RF) foi utilizado para calibrar modelos de predição do teor de fósforo disponível do solo, sendo testadas diferentes combinações de covariáveis do solo e do terreno, resultando em seis modelos. As predições espaciais foram avaliadas com base em um conjunto de dados independentes ($n = 50$ amostras). O teor de fósforo disponível das amostras variou de 4,76 a 220,45 mg dm^{-3} , com média de 48,80 mg dm^{-3} . O modelo que utiliza apenas as covariáveis topográficas (modelo 1), obteve a menor acurácia (RMSE = 30,65 mg dm^{-3}). O modelo calibrado com a combinação de todas as covariáveis do solo (9) e topográficas (14), alcançou a maior acurácia (RMSE = 28,05 mg dm^{-3}). Em geral, todos os modelos que tiveram covariáveis de solo e topográficas inclusas, obtiveram acurácia superior ao modelo que utilizou somente covariáveis topográficas. O modelo 6, calibrado somente com covariáveis do solo, obteve RMSE menor comparado ao modelo 1. Os resultados encontrados indicam que a combinação de covariáveis do solo associadas as topográficas resultam em predições espaciais mais acuradas quando comparadas a predições derivadas de modelos que utilizam apenas covariáveis topográficas.

Palavras-chave: *random forest*, susceptibilidade magnética, teor de ferro, mapeamento digital de solos, agricultura de precisão.

ABSTRACT

USE OF ENVIRONMENTAL COVARIATES ON THE PREDICTION OF SPATIAL VARIATION OF AVAILABLE PHOSPHORUS CONTENT IN SOUTH OF BRAZIL

AUTHOR: Renan Storto Nalin
ADVISOR: Ricardo Simão Diniz Dalmolin

The demand for more accurate maps of soil attributes in agriculture have been increasing over years, especially aiming a more rational use of phosphorus fertilizer which can lead to serious environmental damage, like eutrophication of water bodies. Considering this emergent need, the goal of this work was to evaluate the accuracy of prediction of spatial available phosphorus content, by fitting different models taking into account soil covariates along with relief covariates in Southern region of Brazil. The study was conducted in a rural area of 162 hectares, located in the county of Tupanciretã, Rio Grande do Sul State (RS), Brazil. Soil samples were collected in the 0-10 cm layer, with a density of 1 point per hectare. Based on magnetic susceptibility and chemical and physical analysis of the 162 samples, 9 soil covariates were obtained by Ordinary Kriging (OK). A Digital Elevation Model (DEM) with resolution of 12 meters was used to derivate other 13 topographic covariates. The *random forest* (RF) model was fitted to predict the available phosphorus content on soil by testing different combination of soil and topographic covariates, generating six different models. The spatial prediction were validated based on external, random and independent data (n = 50 samples). Available phosphorus content from samples collected, varied from 4.79 to 220.45 mg.dm⁻³, with an average of 48.80 mg.dm⁻³. The model using only topographic covariates (model 1) presented the lowest prediction ability (RMSE = 30,65 mg.dm⁻³). The best model fitted took into account the combination of all soil covariates (9) and topographic covariates (14), presenting the lowest RMSE (28,05 mg dm⁻³). In general, all models using both sources of information, soil covariates and topographic covariates, presented superior results than the model using only topographic covariates. Model 6, which used only soil covariates presented better results (lower RMSE) than model 1. The results presented on this study clearly shows that the combination of soil covariates along with topographic results on spatial prediction more accurate than predictions from models based only on topographic covariates.

Key-words: random forest, magnetic susceptibility, iron fraction, digital soil mapping, agriculture precision.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. METODOLOGIA	12
2.1. Área de estudo.....	12
2.2. Amostragem.....	14
2.2.1 Amostragem para calibração	14
2.2.2 Amostragem para validação externa	14
2.3. Análises de laboratório.....	15
2.4. Obtenção das covariáveis.....	16
2.4.1 Obtenção das covariáveis de terreno	16
2.4.2 Obtenção das covariáveis de solo	17
2.5 Predição espacial do P-disponível	18
2.5.1 Definição das covariáveis	18
2.5.2 Parametrização dos modelos	19
2.5.3 Predição espacial	20
2.5.4 Validação externa e computação da incerteza	21
3. RESULTADOS	23
3.1. Descrição dos dados.....	23
3.2. Desempenho dos modelos preditivos	26
4. DISCUSSÕES	32
4.1. Descrição dos dados.....	32
4.2. Desempenho dos modelos preditivos	33
5. CONCLUSÕES	36
REFERÊNCIAS	37
APÊNDICE I – DADOS LABORATORIAIS.....	41
APÊNDICE II - PREDIÇÃO DE ARGILA	42
APÊNDICE III - PREDIÇÃO DE AREIA.....	43
APÊNDICE IV - PREDIÇÃO DE FERRO POR OXALATO (Fe _o).....	44
APÊNDICE V - PREDIÇÃO DE FERRO POR DITIONITO-CITRATO (Fe _d).....	45
APÊNDICE VI - PREDIÇÃO DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (χ_{LF})	46
APÊNDICE VII - PREDIÇÃO DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (χ_{HF})....	47
DESCRIÇÃO DE PERFIL.....	48

1. INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um macronutriente essencial para o crescimento das plantas e exigido em grandes quantidades, especialmente em solos muito intemperizados, como os Latossolos e os Argissolos, que ocupam aproximadamente 58% do território brasileiro (Novais e Smyth, 1999). Dado que não há substitutos para a nutrição de P nas culturas e que as reservas globais de rochas fosfatadas são recursos finitos, estima-se que 60% deste recurso pode se esgotar até o ano 2100 (Van Vuuren et al., 2010). Portanto, é vital aumentar a eficiência e o uso racional deste fertilizante para manter a produtividade agrícola e a segurança alimentar global.

A comunidade acadêmica tem se mobilizado a solucionar problemas como: o mal-uso da adubação fosfatada tem resultado na eutrofização de sistemas aquáticos devido a erosão e escoamento superficial que carrega partículas de solo ricas em nutrientes (Rheinheimer et al., 2020); A escassez dos fertilizantes fosfatados tem culminado no aumento do custo de produção, portanto, é de grande importância para a agricultura de precisão, gerar mapas mais precisos da real variabilidade espacial de cada nutriente (mapas com menor erro associado nas previsões), para que os fertilizantes sejam aplicados nas quantidades adequadas em cada local dentro da lavoura, evitando assim, a contaminação do ambiente e reduzindo custos de produção (Pinto et al., 2013).

Para gerar mapas mais precisos, uma nova abordagem foi proposta por McBratney et al. (2003), essa técnica utiliza imagens de sensores remotos, sistemas de informação geográfica (SIG) e instrumentos para a coleta de amostras de solo in situ e georreferenciadas, permitindo por meio de uma função de predição espacial, a elaboração de mapas de diversas propriedades e classes de solo. Essa equação foi denominada de $S = f(s, c, o, r, p, a, n, \dots)$, onde o solo é uma função do próprio solo (s), do clima (c); dos organismos (o); do relevo (r); do material de origem (p); do tempo (a); e das coordenadas geográficas das observações (n).

Portanto, são necessários dados da propriedade a ser predita para calibrarmos o modelo, podendo ser obtidas por meio de análises físicas e

químicas (uso de reagentes químicos), ou quantificações indiretas por meio de espectroscopia. Desta forma, é importante conhecer quais são as causas da variação espacial das propriedades do solo na paisagem, no caso, o P-disponível, e quais outras propriedades que possam estar correlacionadas.

O P é caracterizado por possuir alta interação com os colóides minerais do solo, formando ligações do tipo complexo de superfície de esfera interna de caráter covalente, o que resulta em baixa mobilidade deste elemento no solo (Sposito, 1989; Ranno et al., 2007). Se tratando de um ânion, a sua interação ocorre com partículas carregadas eletricamente positivas, ou seja, quanto maior a densidade de sítios ácidos de Lewis na superfície dos colóides, maior será a adsorção do fosfato, portanto, este fenômeno ocorre de forma mais intensa na fração argila, devido a sua alta área superficial específica (Novais & Smyth, 1999).

Dentre os argilominerais, os óxidos de ferro e alumínio possuem sítios de ligação com maior afinidade na adsorção específica do fosfato. De acordo com Hernández & Meurer (1998), os teores de Fe extraídos por Fe_d e Fe_o são alguns dos atributos mineralógicos que melhor se relacionam com a capacidade máxima de adsorção de P no solo.

Outra propriedade presente intrinsecamente nos minerais do solo, é a susceptibilidade magnética (SM). Dentre os minerais de maior magnetização presentes no solo, destacam-se a magnetita e a maghemita, ambos minerais são compostos por ferro, presentes em maiores quantidades em rochas máficas, como o basalto (Camêlo et al., 2017). Quanto mais avançado o estágio de imtemperização do solo, maiores são os teores de ferro e também destes minerais, em especial a maghemita, por ser formada pedogênicamente, conseqüentemente, espera-se que ocorra maior adsorção de P neste tipo de solo. Ainda, as leituras de SM são feitas instantaneamente sem necessitam de reagentes químicos, e possui baixo custo para serem obtidas. Ramos et al. (2021) encontrou alta correlação entre a SM e atributos como argila e Fe_d em solos subtropicais no Brasil.

Jeong et al. (2017) mapeou o P-disponível em uma área de aproximadamente 270 mil hectares na Coreia do Sul, utilizando 139 amostras de solo para a calibração do modelo *Random Forest* (RF), os mapas foram

validados por meio de validação cruzada, onde obtiveram um RMSE de 120,4 mg dm⁻³ de P.

Sendo assim, conhecendo as variáveis envolvidas ou que ajudem a explicar a variação de P na paisagem, isso possibilitaria gerarmos um mapa mais preciso, conhecendo a real distribuição espacial da propriedade no solo, portanto, espera-se que as covariáveis de solo (obtidas por meio de análises físicas, químicas e sensores), combinadas com covariáveis topográficas, resultem em mapas mais precisos.

Contudo, o cenário atual ainda carece de informações como, qual modelo preditivo e de quais informações e covariáveis devemos utilizar para se obter mapas mais acurados. Portanto, o presente estudo tem como objetivo, testar se há melhoria na acurácia da predição espacial do teor de P-disponível no solo, ao calibrar diferentes modelos que combinem covariáveis topográficas e do solo, em uma área agrícola na região Sul do Brasil.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

Este estudo foi realizado em uma área de produção agrícola de 162 hectares (ha) localizada no município de Tupanciretã, região norte do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil (Figura 1). A geologia da região é constituída por rochas vulcânicas da Formação Serra Geral (CPRM, 2008). O relevo varia entre plano a suave ondulado e ondulado, com altitude média de 480 m, variando entre 430 e 500 m. O clima da região é subtropical úmido com verões quentes (Cfa) e temperatura média acima de 22°C (Alvares et al., 2013).

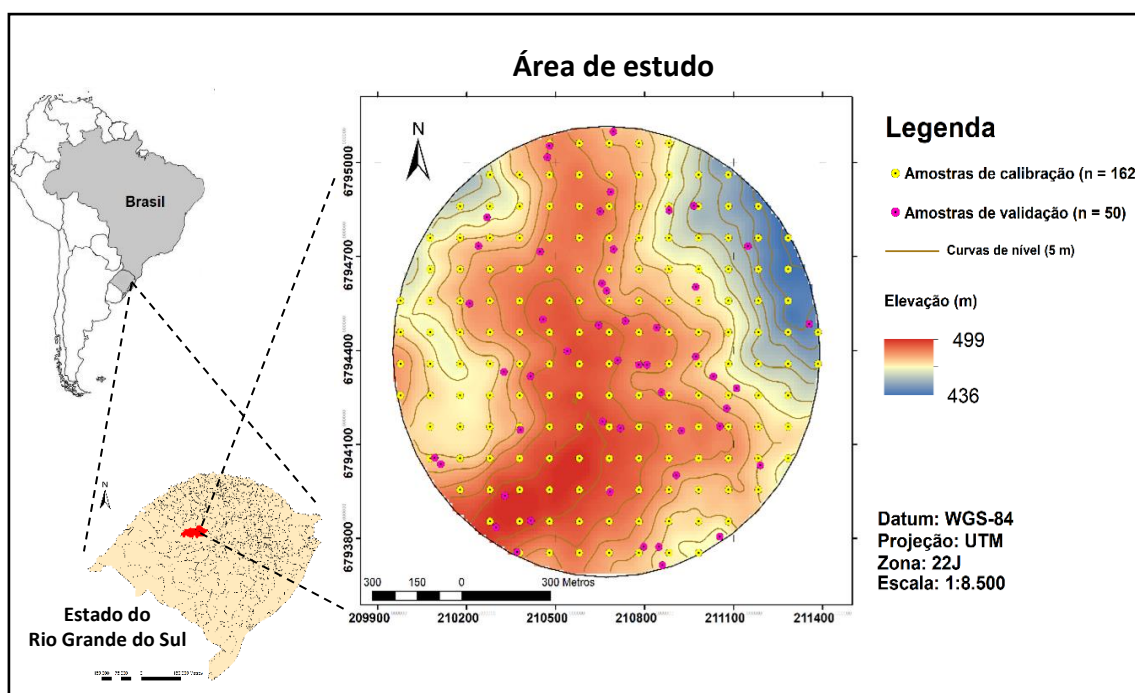


Figura 1. Mapa da localização da área de estudo com os pontos amostrados a campo.

As principais classes de solos encontrados na área são Nitossolo Vermelho, Neossolo Litólico, Neossolo Regolítico, Cambissolo Háplico e Planossolo Háplico, conforme o mapa de solos realizado por Soligo (2021) (Figura 2b). Nas cotas mais altas e planas do terreno, predominam solos com alto grau de intemperismo, profundos e bem drenados, como os Nitossolos, com alto teor de argila, composta predominantemente por caulinita e óxidos de ferro. À medida que a declividade aumenta, surgem os Cambissolos, caracterizados

por possuir um horizonte B-incipiente. Já nas porções mais declivosas, onde o material é facilmente erodido, predominam os Neossolos com pouca profundidade e elevada pedregosidade. Nas cotas mais baixas e planas do relevo, o material erodido é sedimentado, dando origem a solos profundos e mal drenados, como os Planossolos.

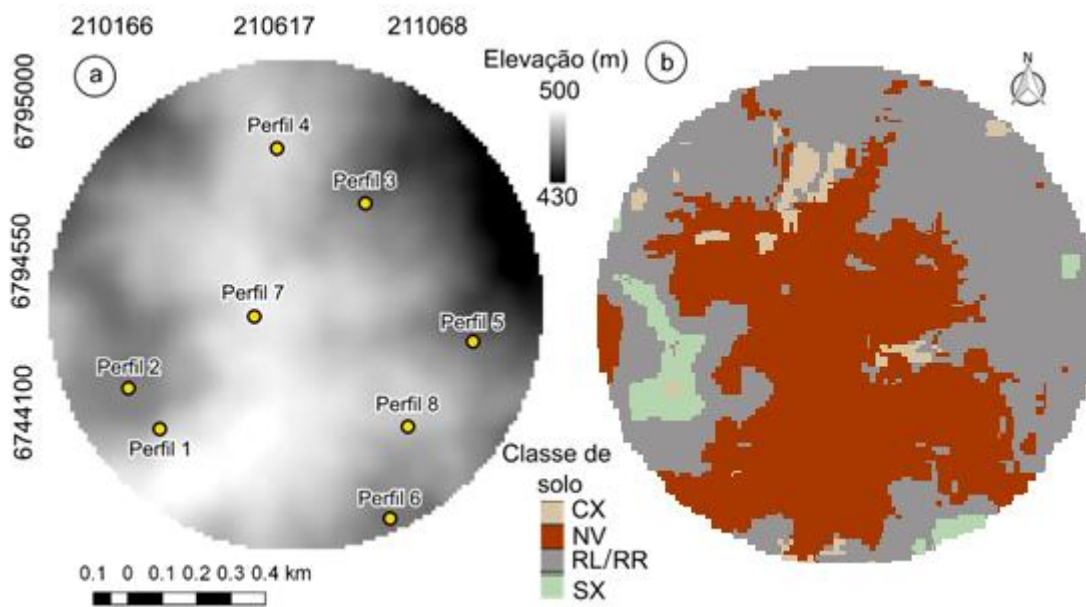


Figura 2. Distribuição dos perfis descritos na área de estudo com imagem da elevação (ELEV) ao fundo (a); mapa temático das classes de solo (b). Em que CX: Cambissolo Háplico, GX: Gleissolo Háplico, NV: Nitossolo Vermelho, RL: Neossolo Litólico, RR: Neossolo Regolítico e SX: Planossolo Háplico.

A área de estudo vem sendo utilizada com lavouras anuais (milho e soja no verão; trigo, aveia e nabo no inverno) manejadas sob sistema de plantio direto. A área possui sistema de irrigação por meio de pivô central. A irrigação das culturas é feita diariamente em períodos de estiagem, principalmente devido a ocorrência de solos rasos, Neossolos (~45% da área), que em geral, apresentam baixa retenção de água. As práticas de adubação e calagem são realizadas em taxa variável, conforme indicação de mapas de produtividade e teores de nutrientes providos de análises de solo. Recentemente, a aplicação de P tem sido feita à lanço, entretanto, há registros de aplicação na linha de semeadura.

2.2. Amostragem

2.2.1 Amostragem para calibração

Diferente das covariáveis topográficas, que podem ser obtidas remotamente e de forma gratuita, as covariáveis de solo necessitam ser coletadas a campo e analisadas em laboratório. Diante disso, um total de 162 pontos foram dispostos na área de estudo, em um grid, de maneira equidistante (100 x 100 m), este design de amostragem é popularmente utilizado no mundo todo, especialmente por empresas de agricultura de precisão (Cherubin et al., 2014), pois, proporciona facilidade e agilidade em se orientar dentro da área de estudo para localizar os pontos amostrais georreferenciados. Em cada ponto amostral, uma única amostra simples foi coletada na profundidade de 0 a 10 cm, profundidade essa, recomendado para culturas anuais conforme descrito no Manual de adubação e calagem para o estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS – RS/SC, 2016).

2.2.2 Amostragem para validação externa

Com o objetivo de obter estimativas imparciais e válidas das medidas de qualidade do mapa, um conjunto amostral adicional, não usado na calibração dos modelos de predição espacial, foi obtido por meio de amostragem probabilística (Stehman, 1999; Brus et al., 2011). Nesse tipo de amostragem, todas as unidades na área de estudo têm uma probabilidade positiva de serem selecionadas, e a probabilidade de seleção de qualquer combinação de unidades amostrais é conhecida. Considerando que, na área de estudo a declividade exerce forte influência sobre a variabilidade do solo na paisagem, ela foi considerada como critério de estratificação da amostragem. A partir dela, 50 amostras foram distribuídas em três intervalos de declividade (Tabela 1). Deste modo foi possível garantir que houvesse, pelo menos 1 ponto amostral em cada classe de declividade.

Tabela 1. Distribuição dos pontos de validação por classes de declividade conforme Santos et al. (2018).

Classe de declividade	Declividade (%)	Área (ha)	Pontos de validação
Plano	0 a 3	13	5
Suave ondulado	3 a 8	64	18
Ondulado	8 a 20	83	27

2.3. Análises de laboratório

As amostras de solo coletadas, foram secas ao ar, moídas e passadas em peneira de 2 mm, constituindo a terra fina seca ao ar (TFSA) e posteriormente submetidas às análises químicas e físicas.

O teor de P disponível foi extraído por meio do extrator Mehlich-1 e determinado por *spectrophotometry* à 882 nm (Teixeira et al., 2017).

A granulometria foi determinada pelo método da pipeta com dispersão química com solução de NaOH 1 mol L⁻¹ e agitação mecânica (Teixeira et al., 2017).

A susceptibilidade magnética foi determinada em baixa (χ_{LF}) e alta (χ_{HF}) frequência na fração TFSA do solo em um magnetômetro Bartington com sensor de frequência dual (Sistema MS2-B), segundo Torrent et al. (2006). De acordo com Dearing (1994) a χ_{HF} reflete a expressão magnética dos minerais litogênicos, como a magnetita (Fe₃O₄), presente na fração areia e silte. Enquanto a χ_{LF} corresponde aos minerais pedogênicos, como a maghemita (γ -Fe₂O₃), encontrada na fração argila. Ao calcular a susceptibilidade magnética de frequência dependente ($\chi_{FD} = \chi_{LF} - \chi_{HF}$) e a diferença percentual entre as susceptibilidades magnéticas determinadas em baixa e alta frequências [D% = (χ_{FD} / χ_{LF}) * 100], isso possibilita identificar a origem dos minerais pedogênicos. Altos valores de χ_{FD} , são um indício de que houve a formação de maghemita resultante da oxidação da magnetita durante a pedogênese deste solo (RESENDE et al. 1988).

Os teores de ferro foram determinados por dois métodos, sendo, o primeiro deles, segundo Mehra & Jackson (1960), utiliza uma solução extratora de ditionito-citrato-bicarbonato (DCB), definida como Fe_d , onde os teores de Fe são determinados por espectrofotometria de absorção atômica. Segundo este autor, este método visa dissolver os óxidos de ferro com estrutura cristalina definida, como hematita e goethita, além daqueles menos cristalinos. O segundo método empregado, visa avaliar formas de óxidos menos ordenadas (Fe_o), como, por exemplo, a ferridrita e a lepidocrocita. A extração foi feita por solução de oxalato ácido de amônio conforme Schwertmann (1964). O Fe foi determinado por espectrofotometria de absorção atômica.

2.4. Obtenção das covariáveis

2.4.1 Obtenção das covariáveis de terreno

Para a obtenção das variáveis topográficas, foi utilizado um Modelo Digital de Elevação (MDE) disponibilizado gratuitamente pela National Aeronautics and Space Administration (NASA), disponível em <https://search.asf.alaska.edu/>. A imagem selecionada é oriunda do satélite ALOS que tem como resolução espacial 12,5 metros, a escolha da imagem foi realizada com base na melhor resolução espacial e gratuita disponível.

Com base nos valores de elevação oriundos do MDE, foram derivados 13 atributos topográficos (Tabela 2). A obtenção das covariáveis foi realizada utilizando a ferramenta Terrain Analyses do software SAGA GIS (Olaya, 2004). Essas covariáveis compuseram o conjunto de covariáveis topográficas (fator R), que são dados gratuitos e prontamente acessíveis.

Tabela 2. Variáveis topográficas derivadas do MDE.

Abreviação	Variável	em inglês	Unidade
ELEV	Elevação	Elevation	metro
CI	Índice de convergência	Convergence index	metro

CNBL	Nível base da rede de drenagem	Channel Network Base Level	metro
CND	Distancia da drenagem	Channel network distance	metro
GN	Curvatura geral	Geral curvature	metro
PL	Curvatura planar	Planar curvature	metro
PR	Curvatura do perfil	Profile curvature	metro
LS	Fator LS	LS Factor	adimensional
RSP	Posição relativa do declive	Relative slope position	metro
SLOPE	Declividade	Slope	graus
TRI	Índice de rugosidade do terreno	Terrain ruggedness index	adimensional
TWI	Índice de umidade topográfica	Topographic Wetness Index	adimensional
VD	Profundidade do vale	Valley depth	metro
VDCN	Elevação acima da rede de drenagem	Elevation Above Channel Network	metro

2.4.2 Obtenção das covariáveis de solo

Constatada a dependência espacial dos 162 pontos amostrados, estes, foram utilizados para calibrar um modelo preditivo e produzir nove mapas por meio de Krigagem Ordinária (OK). As propriedades foram definidas por apresentarem alta correlação com o P-disponível.

O método OK, baseado na teoria das variáveis regionalizadas, assume que as variáveis envolvidas são aleatórias, mas espacialmente correlacionadas em alguma escala (Matheron, 1963). É o método geoestatístico de interpolação mais comum, e a precisão das previsões é determinada pelo tamanho da amostra e pela distribuição dos pontos de amostragem. Portanto, ao utilizar este método de predição, foi possível maximizar o efeito do relevo na predição do P-disponível quando predito por um modelo determinístico, tal como o *Random Forest* (McBratney et al., 2003).

Os parâmetros iniciais de interpolação (pepita, variância e alcance), foram definidos conforme o semivariograma experimental (anexados no APÊNDICE), e posteriormente estimados por meio do algoritmo restricted maximum likelihood (REML), por ser um método eficiente para estimar parâmetros de modelos lineares (Marchant and Lark, 2007). O pacote 'georob' (Papritz, 2020) foi utilizado para o processamento no software R (R Core Team, 2020). A distribuição dos dados foi avaliada pelo teste Shapiro-Wilk, e para os dados cuja distribuição não se adere a distribuição normal, foi considerada normal, o argumento turning.psi foi ajustado para 2, o qual considera a média ponderada entre o valor da mediana e o valor médio dos dados para realizar as previsões.

Assim, foram gerados nove covariáveis do solo, sendo elas, mapas de: argila, areia, Fe_d , Fe_o , Fe_o/Fe_d , χ_{LF} , χ_{HF} , χ_{FD} e $D\%$. A obtenção destas covariáveis é mais onerosa, pois demanda tempo e gastos com reagentes químicos, exceto a susceptibilidade magnética, onde dispensa o uso de reagentes químicos.

A estatística descritiva dos dados, bem como os parâmetros dos modelos e as respectivas acurácias dos mapas destas propriedades do solo estão disponíveis no apêndice.

2.5 Predição espacial do P-disponível

2.5.1 Definição das covariáveis

As covariáveis topográficas (Tabela 2) e do solo (item 2.4.2), foram separadas em seis conjuntos, com base na origem (frações granulométricas, Fe e SM) e disponibilidade (MDE).

- i) modelo 1: $P \sim 14$ covariáveis topográficas
- ii) modelo 2: $P \sim 14$ covariáveis topográficas + argila + areia
- iii) modelo 3: $P \sim 14$ covariáveis topográficas + Fe_o + Fe_d + Fe_o/Fe_d
- iv) modelo 4: $P \sim 14$ covariáveis topográficas + χ_{LF} + χ_{HF} + χ_{FD} + $D\%$
- v) modelo 5: $P \sim 14$ covariáveis topográficas + 9 covariáveis pedológicas
- vi) modelo 6: $P \sim 9$ covariáveis pedológicas

No modelo 1, a distribuição do P na paisagem é representada apenas por variações do terreno. Esse modelo foi considerado o modelo referência por ser obtido com covariáveis exclusivamente gratuitas e prontamente disponíveis à comunidade, portanto, é a melhor estimativa de P que podemos obter sem custos analíticos adicionais, demandando apenas o processamento de dados.

A inclusão das covariáveis de solo junto as topográficas foram divididas em granulométricas (modelo 2), frações de Fe (modelo 3) e frações de SM (modelo 4), visando avaliar a redução do erro na predição em relação ao modelo de referência (modelo 1). O modelo 5 combinou todas as covariáveis topográficas e do solo. Um ultimo modelo utilizou apenas as covariáveis de solo para avaliar o seu erro isolado (modelo 6).

2.5.2 Parametrização dos modelos

O modelo random forest foi escolhido por ser uma técnica não paramétrica desenvolvida por Breiman (2001) como uma extensão dos sistemas CART (Classification and Regression Tree) para melhorar o desempenho dos preditores. As florestas aleatórias são uma combinação de muitas árvores preditivas (floresta), onde cada árvore é derivada de um vetor aleatório amostrado de forma independente e com a mesma distribuição para todas as árvores da floresta. As subdivisões dentro de cada árvore são determinadas com base em um subconjunto de variáveis preditoras escolhidas aleatoriamente do total de preditores fornecidos. Os resultados consistem na média dos resultados de todas as árvores da floresta (Breiman 2001; Cutler et al., 2007).

Para implementar os modelos de *random forest*, três hiperparâmetros são necessários: número de árvores na floresta (*ntree*); e número de covariáveis usadas em cada árvore (*mtry*) (Liaw e Wiener, 2002). Estes hiperparâmetros foram ajustados na validação cruzada com 10 k-fold usando o recurso *bestTune* do pacote *caret*. O modelo final de teor de P disponível com *mtry* e *ntree* específicos foi selecionado com base na minimização da raiz do erro quadrático médio (RMSE, eq. 1).

Para garantir que todas as covariáveis elencadas tivessem uma relação com a variável de interesse (P), foi utilizado o recurso de eliminação recursiva,

algoritmo RFE do pacote Caret (Kuhn, 2017). Este algoritmo elimina iterativamente os preditores menos promissores do modelo com base em uma medida de importância do preditor inicial (Kuhn e Johnson, 2013). O conjunto completo de covariáveis foi considerado e, com base na minimização do erro quadrático médio (RMSE) considerando um corte de 0,5%, nenhuma das covariáveis foi eliminada.

2.5.3 Predição espacial

Os dados foram separados aleatoriamente em 70% para calibração e 30% para calibração (teste). Para cada combinação de covariável ambiental, um modelo foi reajustado 100 vezes usando 70% dos dados, e as previsões derivadas dos modelos ajustados são comparadas com as observações dos demais 30%. Em cada modelo foi calculado o coeficiente de determinação (R^2 - a quantidade de variação explicada pelo modelo, eq. 2), erro médio (EM, eq. 3) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE), que representam as medidas de qualidade do modelo (estatísticas de calibração). O processo de várias repetições é importante para determinar a variabilidade da predição uma vez que diferentes grupos de conjuntos de dados de treinamento e validação podem gerar diferentes precisões resultados (Kuhn e Johnson, 2013).

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

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

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i) \quad (3)$$

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

O mapa final do conteúdo de P-disponível na camada 0-10cm resultou do valor médio para cada pixel entre 100 realizações.

2.5.4 Validação externa e computação da incerteza

A incerteza foi assumida como sendo o desvio padrão das previsões em cada pixel entre 100 realizações, representando um limite para o qual assumimos que cairão. A validação final do mapa foi realizada pela computação das métricas de acurácia recém citadas, com base na comparação entre o valor médio de P-disponível previsto na área e os valores medidos de P-disponível do conjunto de validação externa.

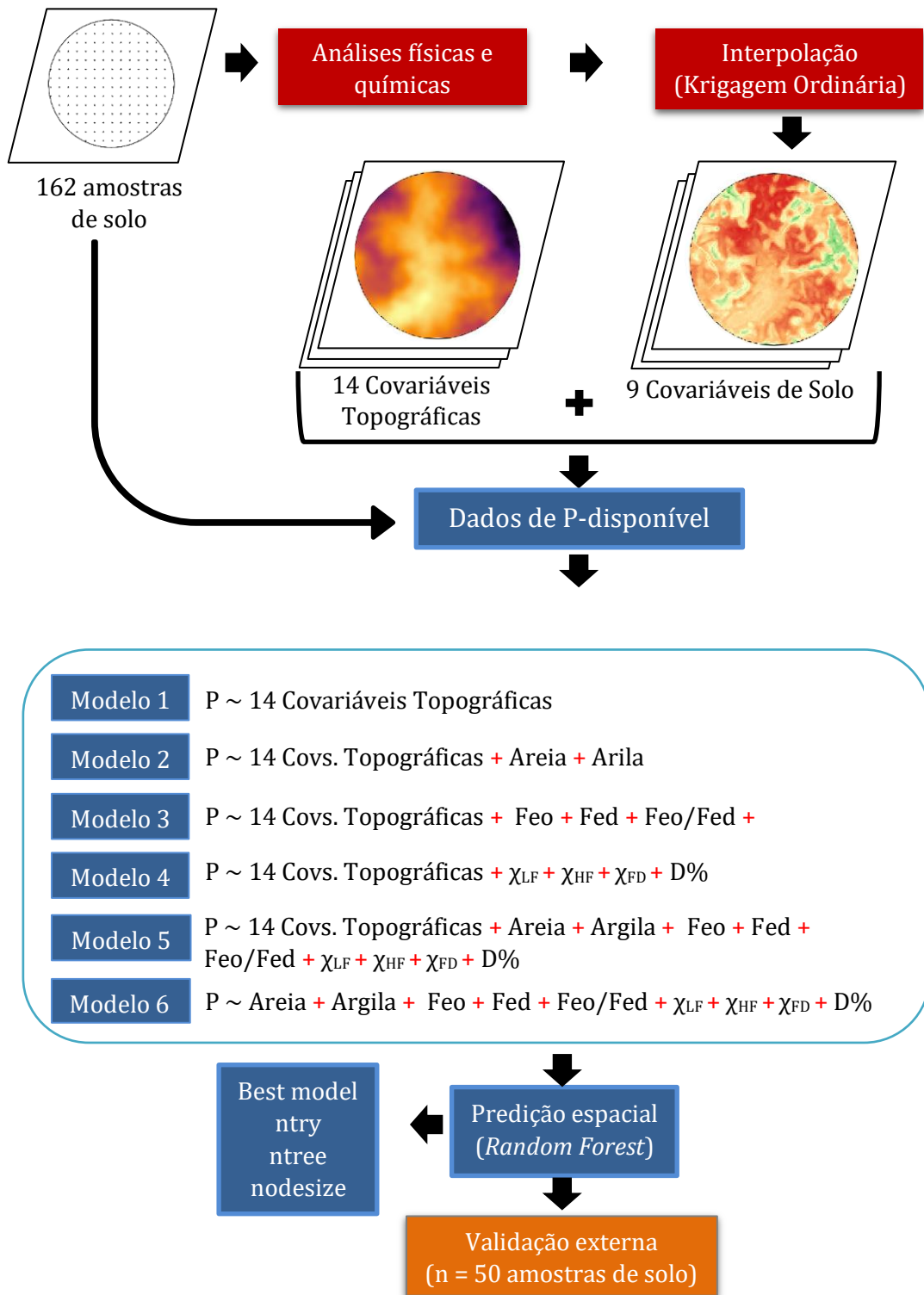


Figura 3. Fluxograma metodológico.

3. RESULTADOS

3.1. Descrição dos dados

O teor médio de P das amostras do conjunto de treinamento foi de 48,8 mg dm⁻³, com amplitude variando de 4,76 a 220,45 mg dm⁻³ (Fig. 4a). No conjunto de validação a média foi de 31,87 mg dm⁻³, com amplitude variando de 6,25 a 155,75 mg dm⁻³ (Fig. 4b). Segundo o teste de Levene, ambos conjuntos apresentam variância homogênea. De acordo com o manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, os valores encontrados na área de estudo estão em um nível muito alto (> 25 mg dm⁻³).

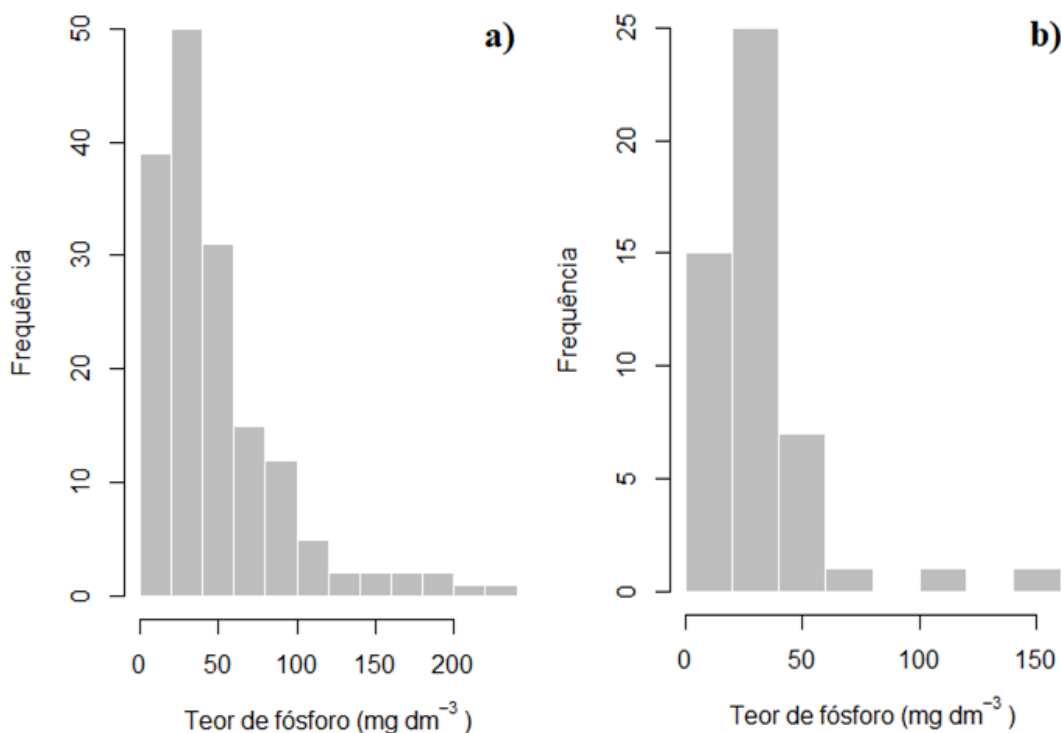


Figura 4. Histograma dos dados de fósforo (a) conjunto de treinamento (b) conjunto de validação.

Em relação às covariáveis de solo (Tabela 3), a argila apresentou valores entre 23,28 e 38,70 %, com média de 31,25 %, a areia variou entre 22,83 e 37,34 %, e média de 29,67 %. Os teores de Fe_o tiveram amplitude de 2,27 a 3,37 g dm⁻³, com média de 2,70 g dm⁻³, enquanto os teores de Fe_d variaram de 14,94 e 43,41 g dm⁻³ e média de 28,26 g dm⁻³. Para a SM determinada em χ_{LF} e χ_{HF} , os

valores se mantiveram entre 21,84 a 86,11 e 21,68 a 83,84, com média de 57,54 e 55,76, respectivamente.

Tabela 3. Medidas de estatísticas descritivas das covariáveis utilizadas na predição do P.

	média	dp	mín	máx
Covariáveis topográficas				
ELEV	478,28	12,49	436,38	499
CI	0,13	7,24	-69,09	82,34
CNBL	463,82	11,43	436,08	486,12
CND	14,48	9,70	0	43,51
GN	$7,18^{-5}$	79,10	$-3,71^{-3}$	$1,38^{-2}$
PL	$-4,81^{-3}$	$1,41^{-3}$	$-5,27^{-3}$	$4,93^{-3}$
PR	$1,18^{-5}$	$1,37^{-3}$	$-5,09^{-5}$	$3,86^{-3}$
LS	0,83	0,56	0	4,92
RSP	0,66	79,1	0	1
SLOPE	$7,33^{-2}$	$3,72^{-2}$	0	0,21
TRI	0,66	0,31	$2,38^{-3}$	1,92
TWI	7,30	1,69	4,78	19,28
VD	6,32	6,52	0	25,11
VDCN	30,60	10,73	0,15	48,94
Covariáveis de solo				
Argila (%)	31,25	3,68	23,28	38,70
Areia (%)	29,67	2,77	22,83	37,34
Fe _o (g dm ⁻³)	2,70	0,22	2,27	3,37
Fe _d (g dm ⁻³)	28,26	4,85	14,94	43,41
Fe _o / Fe _d (g dm ⁻³)	0,09	0,01	0,06	0,18
$\chi_{LF} 10^{-7} m^3 kg^{-1}$	57,54	11,12	21,84	86,11
$\chi_{HF} 10^{-7} m^3 kg^{-1}$	55,76	10,72	21,68	83,84

$\chi_{FD} 10^{-7} m^3 kg^{-1}$	0,18	0,09	0,06	0,01
D%	0,18	0,09	0,06	0,01

Fonte: Autor.

Em que dp: desvio padrão, mín: mínimo, máx: máximo, ELEV: elevação, CI: índice de convergência, CNBL: nível base da rede de drenagem, CND: distância da drenagem, GN: curvatura geral, PL: curvatura planar, PR: curvatura do perfil, LS: fator LS, RSP: posição relativa do declive, SLOPE: declividade, TRI: índice de rugosidade do terreno, TWI: índice de umidade topográfica, VD: profundidade do vale, VDCN: elevação acima da rede de drenagem, Feo: ferro extraído por oxalato ácido de amônio, Fed: ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB), χ_{LF} : susceptibilidade magnética determinada em baixa frequência, χ_{HF} : susceptibilidade magnética determinada em baixa frequência, χ_{FD} : susceptibilidade magnética de frequência dependente ($\chi_{FD} = \chi_{LF} - \chi_{HF}$), D%: diferença percentual entre as susceptibilidades magnéticas determinadas em baixa e alta frequência.

Conforme apresentado na tabela 4, houve pouca diferença na média dos teores de argila entre as classes, entretanto, os Nitossolos apresentaram o maior teor médio de argila (33,42%), e também de Fe_d (30,79 g dm^{-3}), em contrapartida, obtiveram o segundo menor valor de P-disponível (44,17 mg dm^{-3}). Os menores valores de Fe_d , Fe_o e χ_{LF} foi observado no solo hidromórficos, como os Planossolos. O maior valor de P-disponível foi encontrado nos Neossolos (57,15 mg dm^{-3}).

Tabela 4. Valores médios de propriedades do solo e do terreno para cada classe de solo.

	Argila (%)	P-disponível (mg dm^{-3})	Fe_d (g dm^{-3})	Fe_o (g dm^{-3})	χ_{LF}	Declividade (%)
Classes	Média					
CX	29,29	40,59	24,93	2,61	52,45	4,45
NV	33,42	44,17	30,79	2,68	56,83	6,13
RL/RR	29,34	57,15	26,33	2,70	58,24	9,07
SX	30,85	54,64	24,32	2,98	41,66	1,43

Fonte: autor

Em que CX: Cambissolo Háplico, NV: Nitossolo Vermelho, RL: Neossolo Litólico, RR: Neossolo Regolítico e SX: Planossolo Háplico. χ_{LF} : susceptibilidade magnética determinada em baixa frequência.

3.2. Desempenho dos modelos preditivos

A Tabela 5 mostra o desempenho preditivo dos modelos no treinamento e na validação externa. Em geral, os modelos explicaram em média 90 % da variação de P no treinamento, enquanto o desempenho do R^2 na validação foi ligeiramente diferente entre as modelos, com média de 17%.

O RMSE variou de 16,82 a 18,86 mg dm^{-3} no treinamento e 28,05 e 30,65 mg dm^{-3} na validação. A maior precisão foi alcançada pelo modelo 5 (RMSE = 16,82 mg dm^{-3} no treinamento), este comportamento foi ligeiramente diferente nos resultados da validação (RMSE = 28,05 mg dm^{-3}), este modelo também apresentou os melhores resultados em outras métricas, como, variância explicada ($R^2 = 0,23$) e MAE = 20,08.

Dentre os modelos testados, o modelo 1 obteve as piores métricas, seu RMSE foi 8,5% maior em relação ao melhor modelo na validação (modelo 5), o mesmo é válido para o $R^2 = 0,10$ e MAE = 24,21.

Mesmo assim, a diferença entre modelos nos resultados da validação é ainda menor do que no treinamento. Em todos os casos, não há grande sub ou superestimação da média.

Tabela 5. Medidas de acurácia dos modelos preditivos no treinamento (média das realizações) e na validação externa.

Modelo	Treinamento		Validação				
	RMSE	R^2	RMSE	R^2	EM	MAE	% mRMSE
1	18,86	0,89	30,65	0,10	-16,48	24,21	-
2	17,57	0,91	29,27	0,16	-16,15	23,07	4,60
3	17,18	0,91	28,70	0,19	-15,99	22,51	6,36
4	17,50	0,91	28,93	0,19	-16,42	22,73	5,61
5	16,82	0,92	28,05	0,24	-16,01	22,08	8,48
6	17,27	0,88	29,96	0,13	-14,25	22,08	2,25

Fonte: Autor.

Em que RMSE: raiz do erro quadrático médio, R^2 : coeficiente de determinação, EM: erro médio, MAE: erro médio absoluto, mRMSE: redução da raiz do erro quadrático médio em relação ao modelo 1 em %.

Dentre as covariáveis topográficas de maior importância na predição (Figura 5), como a elevação (ELEV), curvatura planar (PL), elevação acima da rede de drenagem (VDCN) e fator-LS, tiveram amplitude variando de 436 a 499 m, $-5,27^{-3}$ a $4,93^{-3}$ m, 0,15 a 48,94 m e 0 a 4,92, com valor média de 478 m, $-4,81^{-3}$ m, 30,6 m e 0,83, respectivamente.

No geral, as covariáveis de solo demonstraram maior importância para explicar a variância de P na paisagem. A distribuição espacial de P foi influenciada principalmente por Fe_d , D% e Argila (Figura 5). Além disso, o fator LS, um índice topográfico projetado para identificar áreas sujeitas a maiores perdas por erosão, surge como a segunda ou terceira covariável mais dominante. A razão entre Fe_o/Fe_d do solo, também aparece na lista dos principais preditores.

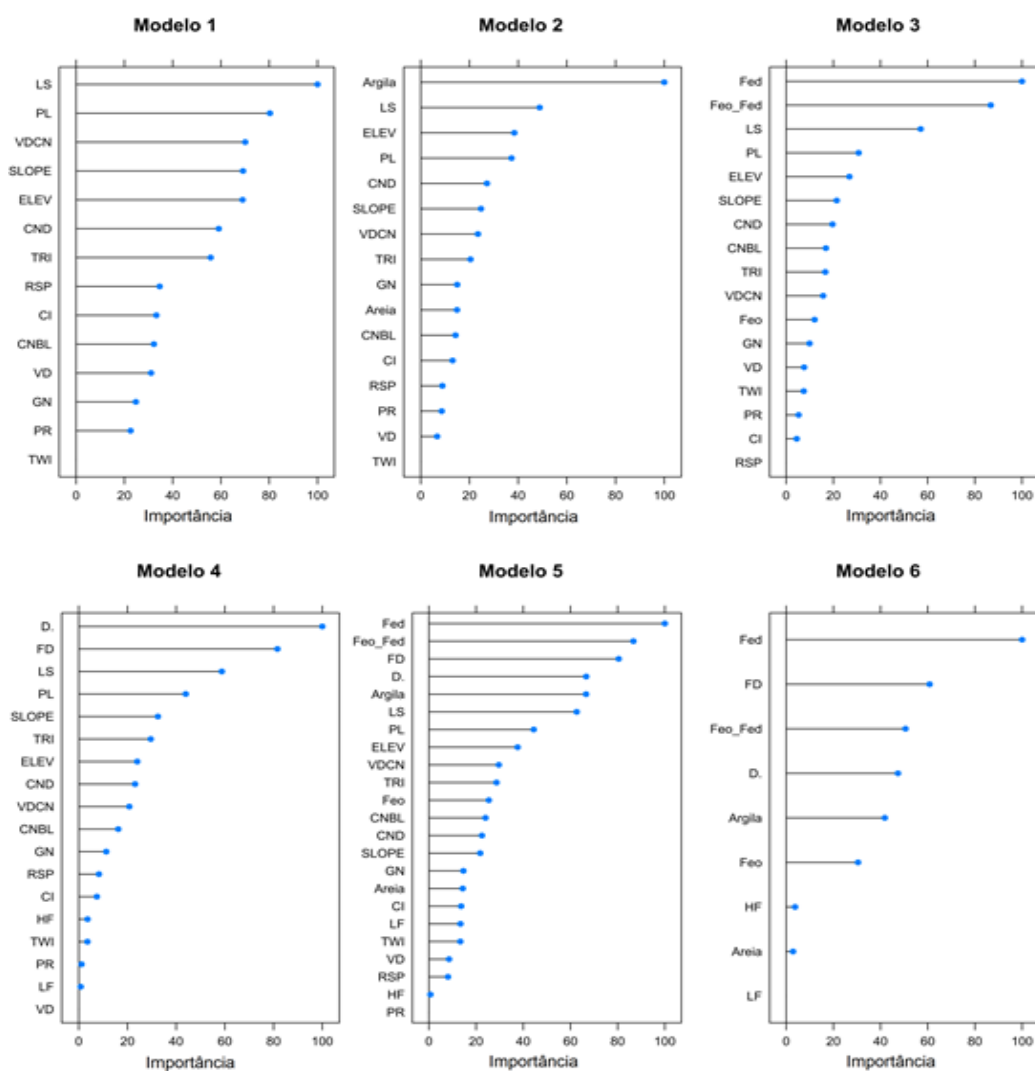
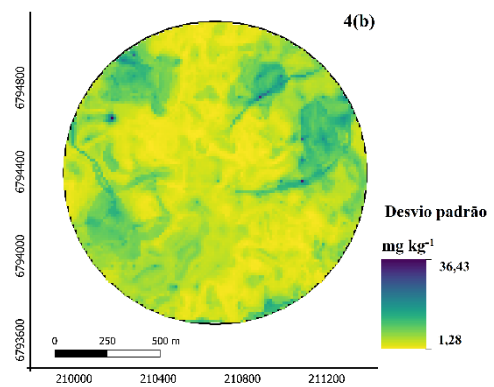
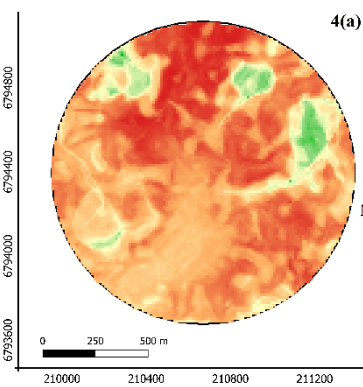
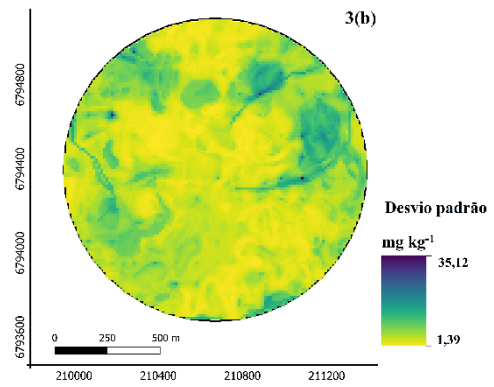
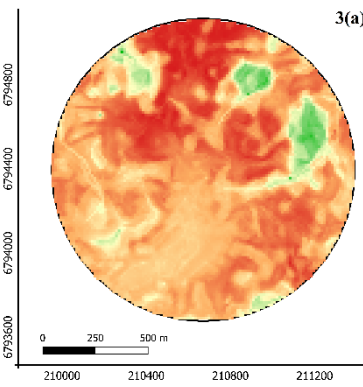
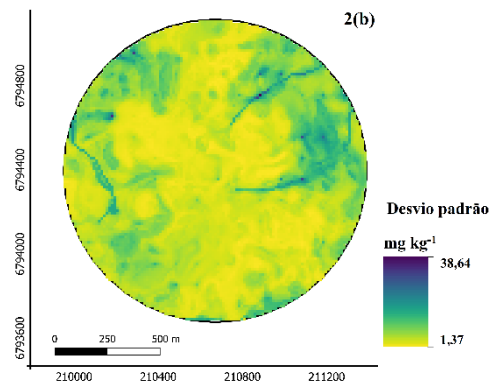
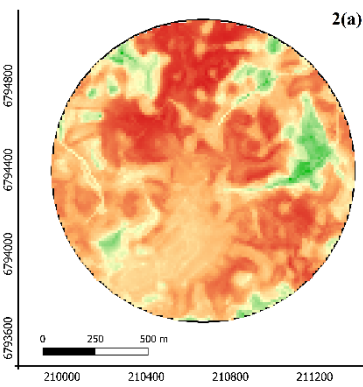
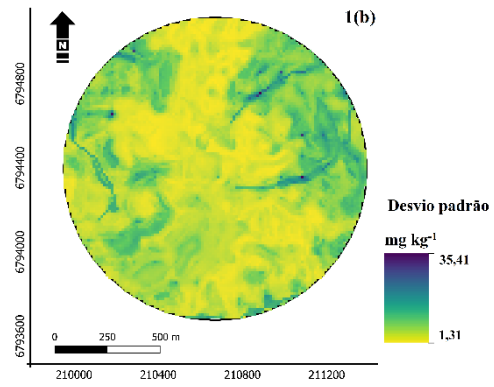
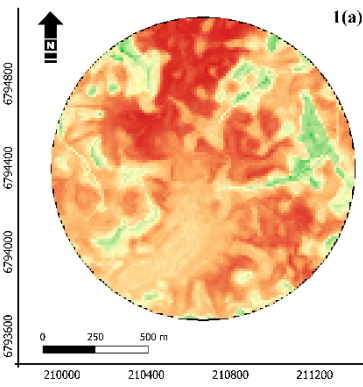


Figura 5. Importância das covariáveis na predição.

Em que: ELEV: elevação, CI: índice de convergência, CNBL: nível base da rede de drenagem, CND: distância da drenagem, GN: curvatura geral, PL: curvatura planar, PR: curvatura do perfil, LS: fator LS, RSP: posição relativa do declive, SLOPE: declividade, TRI: índice de rugosidade do terreno, TWI: índice de umidade topográfica, VD: profundidade do vale, VDCN: elevação acima da rede de drenagem, Feo: ferro extraído por oxalato ácido de amônio, Fed: ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB), χ_{LF} : susceptibilidade magnética determinada em baixa frequência, χ_{HF} : susceptibilidade magnética determinada em alta frequência, χ_{FD} : susceptibilidade magnética de frequência dependente ($\chi_{FD} = \chi_{LF} - \chi_{HF}$), D%: diferença percentual entre as susceptibilidades magnéticas determinadas em baixa e alta frequência.

A média dos valores previstos (Figura 6), variou de 18,09 a 127,77 mg dm⁻³ no modelo 1, de 18,59 a 126,13 mg dm⁻³ no modelo 2, ambos os modelos tiveram pouca variação nos valores médios, entretanto outros modelos tiveram um ligeiro aumento nos valores preditos, como o modelo 3, que variou de 18,62 a 135,33 mg dm⁻³, valores de 18,36 a 140,56 mg dm⁻³ para o modelo 4 e 19,07 a 138,08 mg dm⁻³ para o modelo 5. Já o modelo 6, obteve o maior valor máximo previsto em relação aos demais modelos, variando de 20,04 a 146,44 mg dm⁻³.

De modo geral, os valores iniciais previstos foram semelhantes em todos os modelos, entretanto, os valores máximos tiveram ligeira variação entre os modelos.



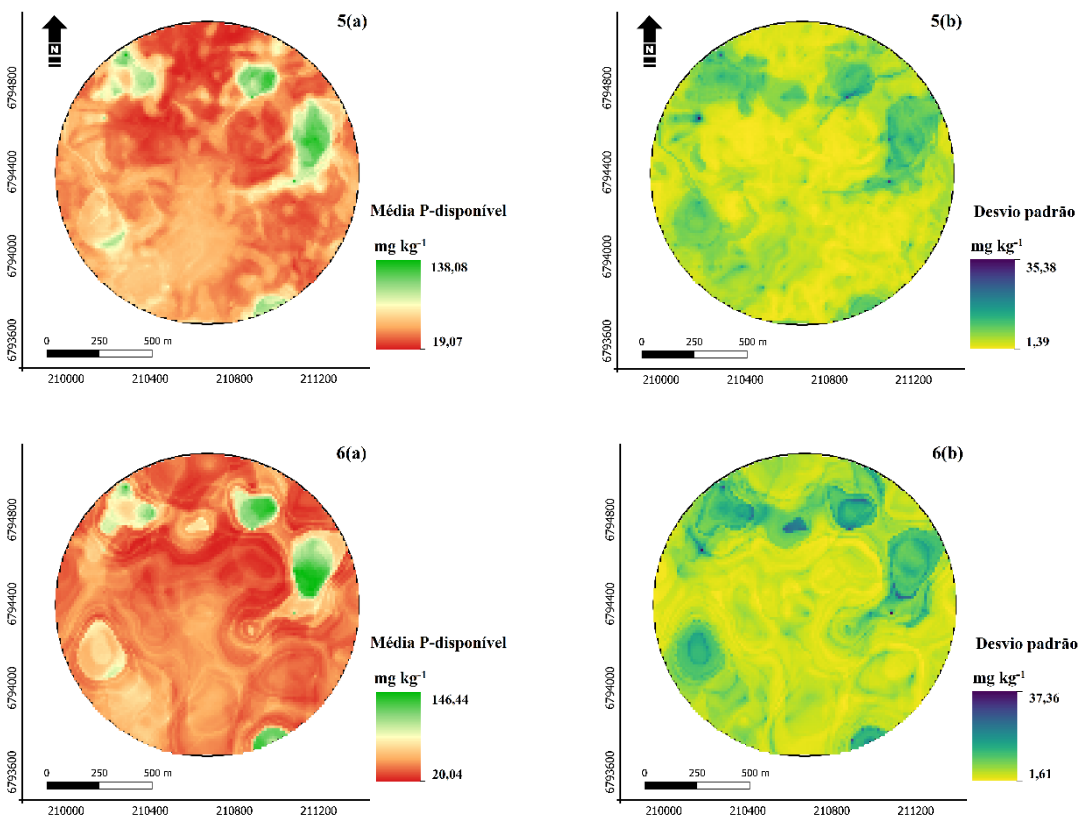


Figura 6. Mapas de teor médio de P-disponível (a) e incerteza (b), o número que antecede cada letra, corresponde ao número do modelo.

A incerteza diminuiu de (máxima) de $38,64 \text{ mg dm}^{-3}$ no modelo 2 para $35,12 \text{ mg dm}^{-3}$ no modelo 3 e, em seguida, aumentou para $36,43 \text{ mg dm}^{-3}$ no modelo 4 (Figura 6). O aumento da incerteza é maior nas áreas de maior declividade e também nas partes baixas do terreno, onde parte do material erodido é depositado.

O modelo 1 apresentou a menor densidade de pixel de desvio padrão (Figura 7) no intervalo de 0 a 5 mg dm^{-3} dentre os modelos, exceto o modelo 6, que obteve poucos pixels entre 0 a $2,5 \text{ mg dm}^{-3}$. O modelo de menor incerteza, ou seja, aquele que obteve a maior densidade de pixel de menor valor de desvio padrão foi o modelo 5.

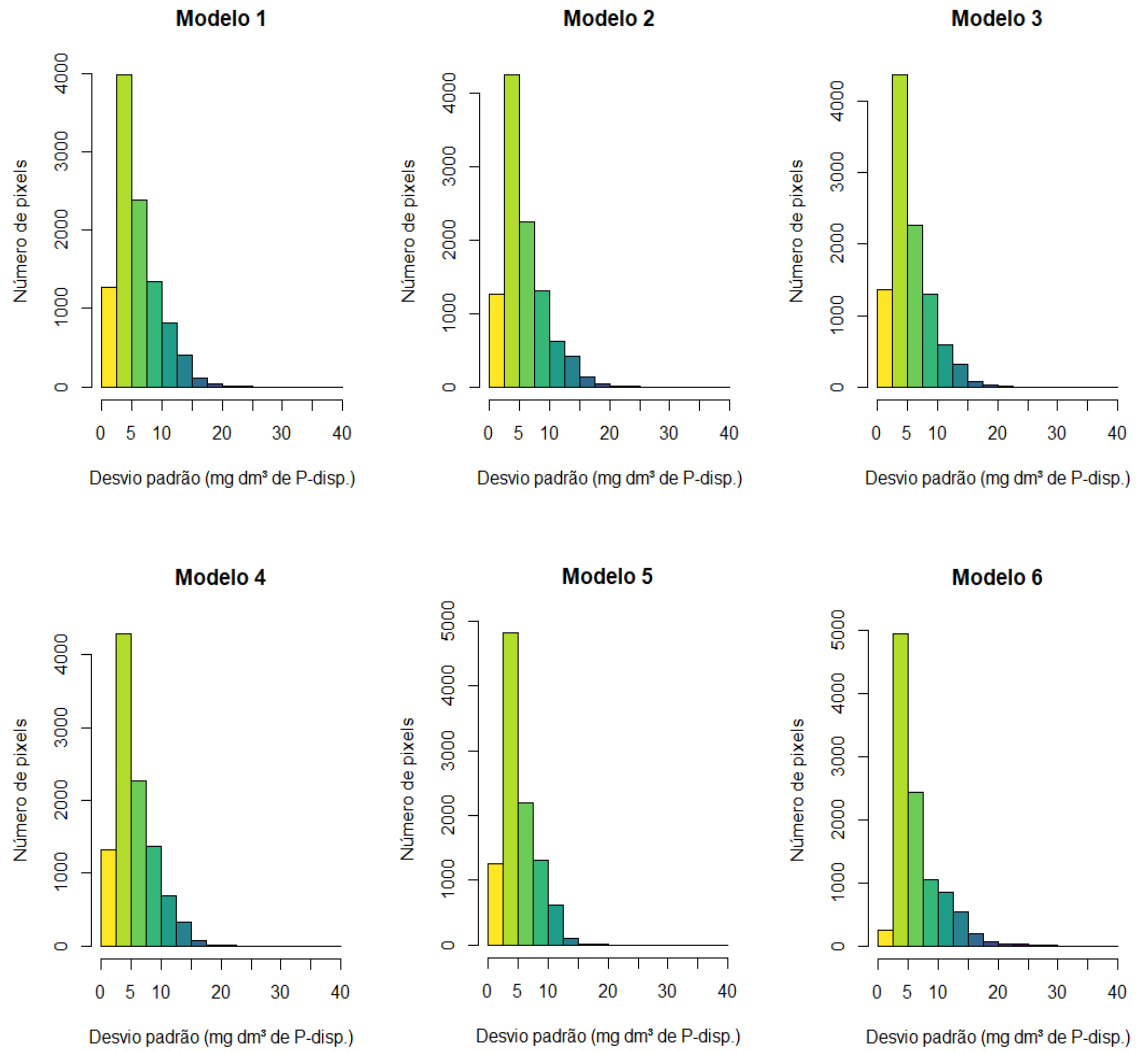


Figura 7. Histogramas do desvio padrão dos mapas preditos.

4. DISCUSSÕES

4.1. Descrição dos dados

A alta variabilidade espacial nos teores de P já era esperada, visto que, a área de estudo, também possui alta variabilidade nos teores de argila, resultando também na variação dos teores de Fe_d e Fe_o . De acordo com Hernandez & Meurer (1998), ambas as formas de ferro são alguns dos atributos mineralógicos que melhor se relacionam com a capacidade máxima de adsorção de P no solo. Resultados semelhantes da variação dos teores do P-disponível foram encontrados em outros estudos (Mallarino & Wittry, 2004; Sana et al., 2014).

De acordo com Novais & Smyth (1999), a variação dos teores de P no solo está intimamente relacionada com a variação granulométrica, especialmente a fração argila, devido a sua alta área superficial específica (ASE). Ainda, solos bem desenvolvidos e intemperizados possuem maior quantidade de argilominerais do tipo óxidos de ferro e alumínio, caracterizados por apresentar alta capacidade de adsorção de íons fosfato.

Outra propriedade do solo que está indiretamente ligada a adsorção específica do fosfato é a susceptibilidade magnética, solos mais intemperizados e derivado de rochas máficas como, o basalto presente na área de estudo, possuem forte atração magnética devido ao alto teor de óxidos de ferro ferromagnéticos (maghemita e magnetita), (Costa et al., 2014; Camêlo et al., 2017).

Logo, ao compararmos os mapas de cada uma dessas propriedades que foram utilizadas como covariáveis preditoras dos teores de P-disponível, percebe-se a estreita semelhança entre os sítios que possuem maiores teores de argila (Figura 9), com aqueles que também apresentam maior teor de Fe_o , Fe_d , χ_{LF} e χ_{LF} (Apêndice - Figuras 13, 15, 17 e 19, respectivamente).

Portanto, se a variação dos teores de fósforo é dependente da variação dessas propriedades, especialmente do teor de argila do solo ao longo da paisagem, essa, por sua vez, é resultante da intensidade dos diferentes fatores de formação do solo Jenny (1941). Ao analisarmos a Figura 2, percebe-se a forte influenciado do fator relevo na variação das classes e também de suas propriedades do solo, uma vez que, o relevo caracteriza os fluxos de água na

paisagem, sendo responsável pela erosão, transporte e deposição dos sedimentos nas partes baixas do terreno (MOORE et al., 1993).

De acordo com Streck et al. (2018), os Neossolos predominam em áreas mais declivosas (acima de 8%), onde as partículas do solo apresentam maior suscetibilidade à erosão, mas também, em áreas pouco declivosas ou planas, devido à resistência do material de origem ao intemperismo. Estes solos, caracterizam-se por serem solos pouco desenvolvidos, o que resulta em pouca profundidade efetiva, baixo volume de solo e menor quantidade relativa de Fe, resultando em maior quantidade de P-disponível (Tabela 4). Ainda, de acordo com este mesmo autor, os Nitossolos são solos ácidos e de baixa CTC (argila de baixa atividade), pelo fato de apresentarem predomínio de argilominerais do tipo caulinita e óxidos de ferro em sua composição. Esta afirmação está de acordo com a Tabela 4, onde esta classe obteve o segundo menor valor de P-disponível, resultante do maior teor de argila e Fe_d , além do segundo maior valor de SM.

4.2. Desempenho dos modelos preditivos

Dentre as covariáveis topográficas utilizadas na predição do P, o fator LS se destacou em primeiro lugar. Segundo Beskow et al. (2009), a intensidade da erosão hídrica pode ser fortemente afetada pelo comprimento do declive (fator L) e seu gradiente (fator S). Kozar et al. (2002) ao trabalhar com predição de P-total por meio de co-krigagem, ao adicionar covariáveis topográficas ao modelo, em especial a declividade, este, foi responsável por explicar grande parte da variabilidade espacial das previsões.

Uma segunda covariável topográfica também foi importante na maior parte dos modelos, Camargo et al. (2012) identificou curvatura planar (PL) como útil para entender os padrões de P-disponíveis espacialmente (Figura 6). Ainda, em contraste com isso, o índice de convergência (CI) relacionado à curvatura, não foi selecionado pelo modelo *random forest* de Jeong et al. (2017), este resultado está de acordo com as nossas previsões onde, CI teve pouca importância em qualquer modelo que a tenha utilizado. Este mesmo autor, ao trabalhar com dados legados de solos em escala de paisagem para três áreas

de estudos diferentes, obteve melhores resultados nas predições de nitrogênio total, fósforo total e potássio total ao combinar covariáveis topográficas e do solo no modelo *random forest*, especialmente ao inserir covariáveis do fator solo, como areia, ferro total (Fe_t) e pH. O mesmo foi observado em nosso trabalho, ao adicionar covariáveis relacionadas a granulometria, tal como argila e areia (modelo 2), e informações referentes as diferentes frações de ferro, como Fe_o , Fe_d e Fe_o/Fe_d (modelo 3), o erro (RMSE) e a incerteza foram menores em relação ao modelo que utiliza apenas covariáveis topográficas (modelo 1). Os elevados valores de RMSE estão associados a grande amplitude dos dados de P-disponível utilizados na calibração do modelo RF.

Dentre os modelos testados, o modelo 1 obteve o maior erro (RMSE = 30,65), ainda, apresentou menor densidade de pixels de menor incerteza (desvio padrão de 0 a 5 mg dm⁻³), logo, obtivemos o pior resultado ao utilizarmos apenas as covariáveis topográficas. Pouco são os estudos que utilizam apenas modelos determinismos em áreas agrícolas (aqueles que utilizam apenas os fatores de formação do solo, tal como o *random forest*), McBratney et al. (2003). Portanto, torna-se difícil comparar os resultados deste estudo com aqueles obtidos em escala de paisagem, ainda, a forma como as predições foram validadas influencia diretamente nas métricas dos erros. Contudo, no presente estudo, observamos que ao adicionarmos covariáveis do solo, o RSME e a incerteza foi menor.

O melhor modelo foi obtido ao combinar todas as covariáveis do solo e do terreno (modelo 5, RMSE = 28,05 mg dm⁻³). A redução do RMSE foi aproximadamente 8,5% em relação ao pior modelo, também se obteve a maior densidade de pixels de baixa incerteza (Figura 7), variando de 0 a 5 mg dm⁻³. Neste modelo, percebe-se a importância que as covariáveis do solo (Figura 5) assumiram ao ajudar a explicar a variação dos teores de P na área de estudo, principalmente aquelas que possuem estreita relação com os teores de ferro, como Fe_d e também a diferença percentual entre as susceptibilidades magnéticas determinadas em baixa e alta frequência (D%).

O quarto modelo, ao combinar covariáveis topográficas com propriedades magnéticas do solo, tal como χ_{LF} , χ_{HF} , χ_{FD} e D%, obteve bons resultados, reduzindo seu erro em até 5,6% em relação ao pior modelo (1). Siqueira et al. (2010) utilizou a SM para estimar atributos do solo, onde encontraram

correlações significativas dela com o teor de argila, a CTC, a capacidade de adsorção de fósforo e o teor de hematita. Pollo (2013) utilizou a SM e outros atributos do solo para discriminar áreas de manejo específico na cultura do café, e encontrou estreita correlação entre as propriedades magnéticas e os teores de P-disponível do solo. A vantagem de se utilizar essa propriedade é que ela pode ser obtida facilmente, possui baixo custo, as leituras são feitas instantaneamente e dispensa o uso de reagentes químicos, ainda, pode ser determinada a campo por meio de sondas (*probe*).

Quando utilizada apenas as covariáveis do solo na predição (modelo 6), a precisão foi maior do que ao utilizar apenas covariáveis topográficas (modelo 1). Isso demonstra que, quando adicionada qualquer covariável do solo que seja, o erro diminui.

Ao analisarmos os mapas de desvio padrão (Figura 6-b), é possível observar que as covariáveis do solo reduziram a incerteza das predições, principalmente em áreas onde o terreno é mais complexo e declivoso, favorecendo o processo erosivo, especialmente onde ocorrem os Neossolos.

O atual cenário brasileiro carece de manuais de adubação e calagem mais atualizados para grandes culturas, pois as faixas de nível crítico para o P-disponível presentes no manual disponível são muito grandes para que haja diferença na recomendação do P neste tipo de trabalho, especialmente em áreas onde teores de P-disponível são considerados muito alto (teor alto [12,1 a 24,0 mg de P/dm³] e muito alto [> 24 mg de P/dm³]). Portanto, ao prescrevermos uma recomendação de fósforo para a nossa área de estudo, a quantidade recomendada foi igual em os modelos testados, devido as grandes faixas generalistas (CQFS – RS/SC, 2016). Para solucionar tal problema, são necessários mais estudos para reduzir os intervalos de nível crítico do P-disponível para cada uma das condições de solo encontradas na região.

5. CONCLUSÕES

O melhor modelo foi obtido combinando todas as covariáveis do solo e do terreno. Quando utilizado apenas covariáveis topográficas, os resultados das previsões foram piores. Ao utilizar apenas covariáveis do solo, a precisão do modelo foi ligeiramente superior ao modelo somente com covariáveis topográficas. Ao combinar ao menos um conjunto de covariáveis do solo junto as topográficas, sejam elas granulométricas ou, das diferentes frações de ferro ou de susceptibilidade magnética e suas razões, obteve-se boas previsões dos modelos.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*. 22, 711-728.
- BESKOW, S.; MELLO, C.R.; NORTON, L.D.; CURI, N.; VIOLA, M.R.; AVANZI, J.C. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. *Catena*, 2009, v. 79, n. 1, p. 49-59.
- BREIMAN, L., 2001. Random forests. *Machine learning*, 45 (1), 5-32.
- BRUS, D. J.; KEMPEN, B.; HEUVELINK, G. B. M. (2011). Sampling for validation of digital soil maps. *European Journal of Soil Science*, 62(3), 394-407.
- CAMÊLO, D.L.; KER J.C.; FONTES, M.P.F.; CORRÊA, M.M.; COSTA, A.C.S.; MELO, V.F. Pedogenic iron oxides in iron-rich Oxisols developed from mafic rocks. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2017;41:e0160379.
- COSTA, A.C.S.; BIGHAM, J.M.; RHOTON, F.E. & TRAINA, S.J. Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. *Clays Clay Miner.*, 47:466-473, 1999.
- COSTA, S.A.D; KER, J.C.; SIMÕES D.F.F.; FONTES M.P.F.; FABRIS J.D.; ANDRADE F.V. Pedogenesis and classification of Latosols developed from itabirites in the region of Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2014, 38:359-71.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2008. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul**. Escala 1:750.000.
- CQFS. Comissão de química e fertilidade do solo – RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 11. ed. Santa Maria: SBCS-Núcleo Regional Sul, 2016. 376 p.
- CUTLER, D.R.; EDWARDS JR. T.C.; BEARD, K.H.; CUTLER, A.; HESS, K.T.; GIBSON, J.; LAWLER, J.J. 2007. **Random forests for classification in ecology**. *ESA*, 88(11), 2783-2792.
- DEARING, J. A. **Environmental magnetic susceptibility**. Using the Bartington MS2 system. England: British Library, 1994, 104 p.
- DEARING, J. **Environmental magnetic susceptibility: Using the Bartington MS2 System**. 2.ed. Kenilworth, Chi Publishing, 1999. 54p

HERNÁNDEZ, J.; MEURER, E.J. Adsorção de fósforo e sua relação com formas de ferro em dez solos do Uruguai. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22:223-230, 1998.

JENNY, H. **Factors of soil formation**: a system of quantitative pedology. New York, London: McGraw-Hill, 1941, 324 p.

JEONG, G.; OEVERDIECK, H.; PARK, S.J.; HUWE, B.; LIEß, M. Spatial soil nutrients prediction using three supervised learning methods for assessment of land potentials in complex terrain. **Catena** 2017, 154, 73–84.

KOZAR, B.; LAWRENCE, R.; LONG, D.S. Soil phosphorus and potassium mapping using a spatial correlation model incorporating terrain slope gradient. **Precision Agriculture**. 2002, 3: 407–417.

MALLARINO, A. P.; WITTRY, D. Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of phosphorus, potassium, pH, and organic matter. **Precision Agriculture**, v. 5, p. 131-144, 2004.

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

MEHRA, O.P. & JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soil and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays Clay Miner.**, 5:317-327, 1960.

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

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

PINTO, F.A.; SOUZA, E. D.; PAULINO, H.B.; CURI, N.; CARNEIRO, M.A.C. **P-sorption and desorption in Savanna Brazilian soils as a support for phosphorus fertilizer management**. Ciênc. agrotec., Lavras, v. 37, n. 6, p. 521-530, 2013.

POLLO, G. Z. **Suscetibilidade magnética, atributos do solo e da planta na discriminação de áreas de manejo específico na cultura do café**. 2013. 79p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

RAMOS, P.V.; DALMOLIN, R. S. D.; MOURA-BUENO, J. M.; JUNIOR, J. M.; SIQUEIRA, D. S.; TEIXEIRA, D. B. Suscetibilidade magnética na caracterização da variabilidade espacial de atributos do solo em solos subtropicais. **Ciência e Natura**, v. 43, e47, 2021.

RANNO, S. K.; SILVA, L. S.; GATIBONI, L. C.; RHODEN, A. C. Capacidade de adsorção de fósforo em solos de várzea do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 1, p. 21-28, 2007.

RESENDE, M.; SANTANA, D.P.; FRANZMEIER, D.P. & COEY, J.M.D. Magnetic properties of Brazilian Oxisols. In: **International Soil Classification Workshop**, Rio de Janeiro, 1988. Proceedings. Rio de Janeiro, 1988. p.78-108.

RHEINHEIMER, D. S.; SCHAEFER, G.L. ; PELLEGRINI, A. ; ALVAREZ, JIMMY RASCE ; CANER, LAURENT ; BORTOLUZZI, E. C. . Weirs Control Phosphorus Transfer in Agricultural Watersheds. **WATER AIR AND SOIL POLLUTION**, v. 231, p. 486, 2020.

SANA, R. S.; ANGHINONI, I.; BRANDÃO, Z. N.; HOLZSCHUH, M. J. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo e seus efeitos na produtividade do algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 10, p. 994-1002, 2014.

Santos, H.G., Jacomine, P.K.T., Anjos, L.H.C., Oliveira, V.A., Lumberras, J.F., Coelho, M.R., Almeida, J.A., Araujo-Filho, J.C., Oliveira, J.B., Cunha, T.J.F., 2018. Brazilian system of soil classification, fifth ed. **Embrapa**, Brasília.

SCHWERTMANN, U. **The differentiation of iron oxide in soil by a photochemical extraction with acid ammonium oxalate**. Z. Pflanzenernähr. Dung. Bodenk., 105:104-201, 1964.

SHARPLEY, A.N.; KLEINMAN, P.J.A.; MCDOWELL, R.W.; GITAU M.; BRYANT, R.B. Modeling phosphorus transport in agricultural watersheds: Processes and possibilities. **Journal Soil Water Conservation**. 2002, 57:425–439.

SHARPLEY, A.N.; WITHERS, P.J.A.; ABDALLA, C.W.; DODD, A.R. 2005. **Strategies for the Sustainable Management of Phosphorus**. Phosphorus: Agriculture and the Environment, Agronomy Monograph No. 46. Madison, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.

SIQUEIRA, D.S. **Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar**. 2010. 75p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

SOLIGO, M. F. **Uso de diferentes métodos de amostragem para a modelagem espacial do solo**. 2021. 71p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York, Oxford University Press, 1989. 277p.

STEHMAN, S.V. 1992. Comparison of systematic and random sampling for estimating the accuracy of maps generated from remotely sensed data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 58, 1343–1350.

STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 2008. 222p.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G.; 2017. Manual of soil analysis methods, third ed. **Embrapa**, Brasília.

VAN VUUREN, D.P.; BELLEVRAT, E.; KITOUS, A.; ISAAC, M. Bio-energy use and low stabilization scenarios. **Energy Journal**, 2010, 31(SPECIAL ISSUE), pp. 193-222.

APÊNDICE I – DADOS LABORATORIAIS

Tabela 5 - Análise descritiva dos dados laboratoriais.

Conjunto de treinamento (n = 162)					
Propriedade	mín	máx	média	dp	cv (%)
Argila (%)	15	51	31,27	6,17	19,27
Areia (%)	20	49	29,77	5,39	18,12
P (mg dm ⁻³)	4,76	220,45	48,80	41,46	84,97
Fe _o (g dm ⁻³)	1,42	9,68	2,76	0,88	31,98
Fe _d (g dm ⁻³)	5,5	57,29	28,30	7,07	24,99
χ _{LF} (adimensional)	2,95	172,29	58,08	21,59	37,17
χ _{HF} (adimensional)	2,91	171,16	56,33	21,09	37,45
Conjunto de validação (n = 50)					
Argila (%)	19	43	31,06	6,47	20,85
Areia (%)	20	49	30,92	6,23	20,16
P (mg dm ⁻³)	6,25	155,75	31,87	25,65	80,45
Fe _o (g dm ⁻³)	1,81	5,78	2,82	0,80	28,40
Fe _d (g dm ⁻³)	7,28	40,69	25,52	5,80	22,72
χ _{LF} (admencional)	2,95	113,0	54,74	19,90	36,52
χ _{HF} (admencional)	2,91	111,66	52,81	19,26	36,47

Fonte: Autor.

Em que n: número de pontos amostrados, mín: mínimo, máx: máximo, dp: desvio padrão, cv: coeficiente de variação; P: fósforo disponível, Fe_o: ferro extraído por oxalato ácido de amônio, Fe_d: ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB), χ_{LF}: susceptibilidade magnética determinada em baixa frequência, χ_{HF}: susceptibilidade magnética determinada em baixa frequência.

APÊNDICE II - PREDIÇÃO DE ARGILA

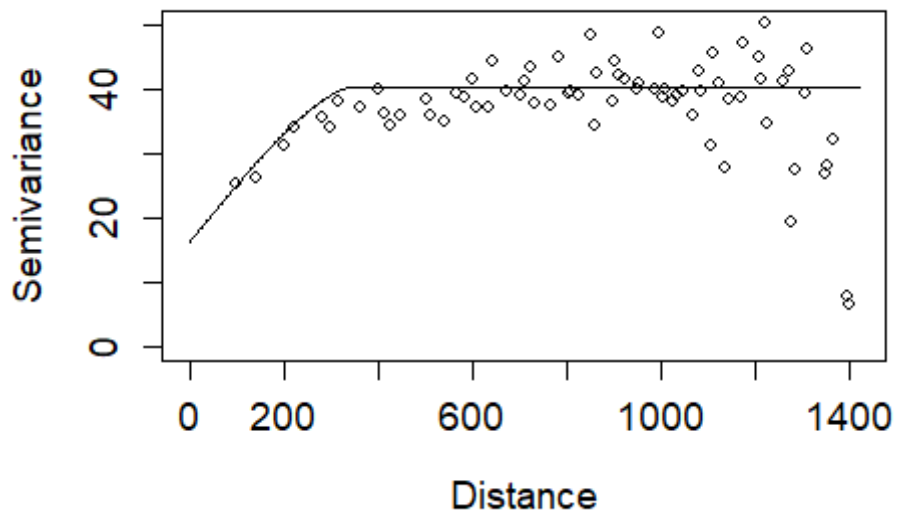


Figura 8. Semi-variograma ajustado com modelo circular, utilizando os parâmetros como variância = 18, pepita = 22 e escala = 220 m.

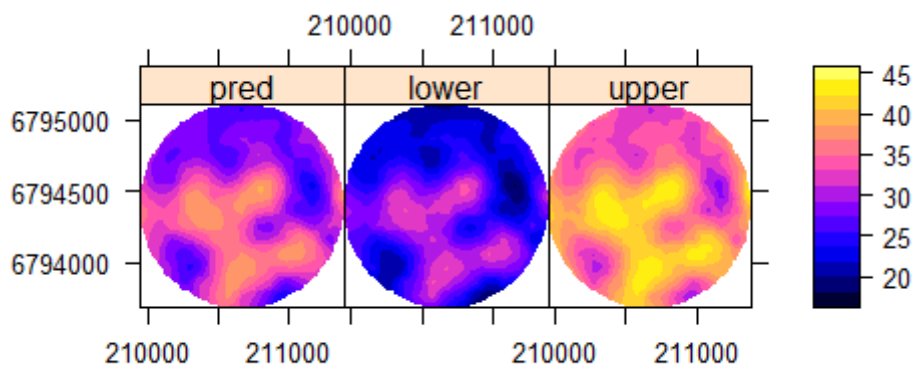


Figura 9. Mapa de argila predito por krigagem ordinária.

Em que pred: valores médios de argila (%) preditos, lower: valores mínimos e upper: valores máximos.

APÊNDICE III - PREDIÇÃO DE AREIA

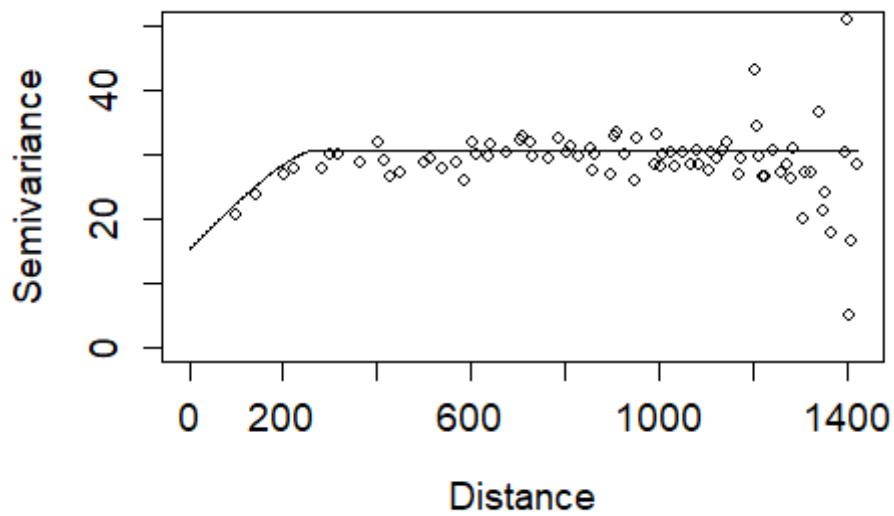


Figura 10. Semi-variograma ajustado com modelo circular, utilizando os parâmetros como variância = 15, pepita = 22 e escala = 240 m.

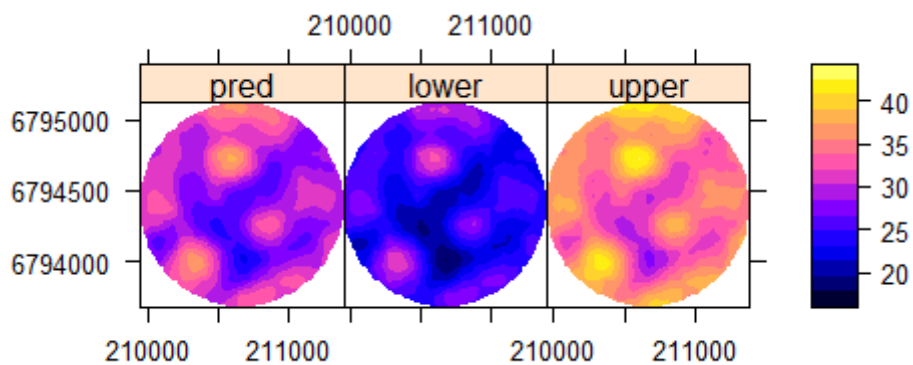


Figura 11. Mapa de areia predito por krigagem ordinária.

Em que pred: valores médios de areia (%) preditos, lower: valores mínimos e upper: valores máximos.

APÊNDICE IV - PREDIÇÃO DE FERRO POR OXALATO (Fe_o)

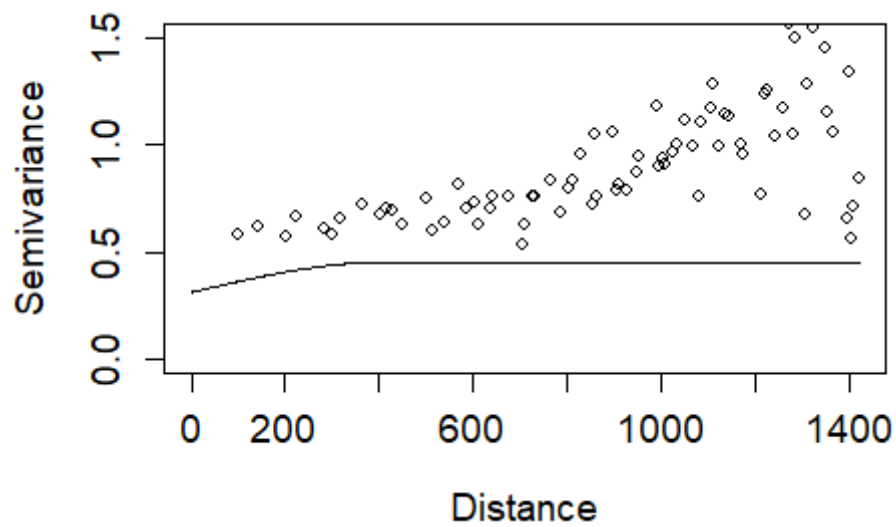


Figura 12. Semi-variograma ajustado com modelo esférico, utilizando os parâmetros como variância = 0.22, pepita = 0.2 e escala = 350 m.

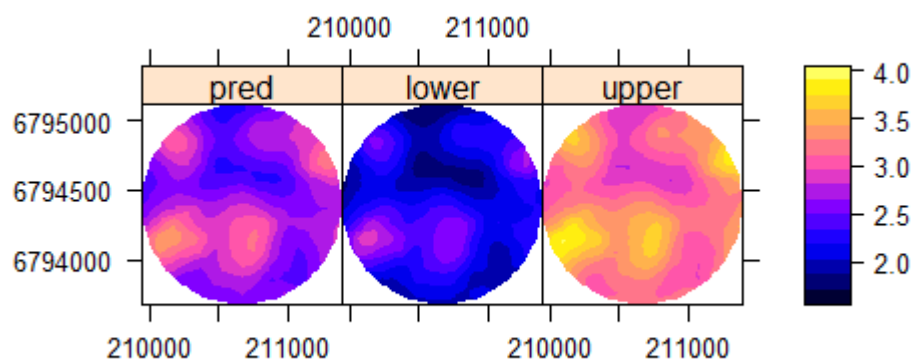


Figura 13. Mapa de Fe_o predito por krigagem ordinária.

Em que pred: valores médios de Fe_o (g dm^{-3}) preditos, lower: valores mínimos e upper: valores máximos.

APÊNDICE V - PREDIÇÃO DE FERRO POR DITIONITO-CITRATO (Fe_d)

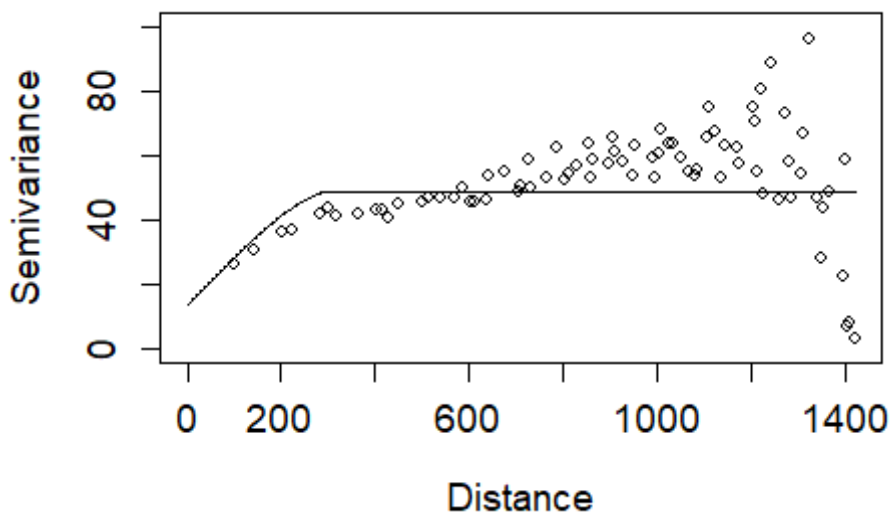


Figura 14. Semi-variograma ajustado com modelo circular, utilizando os parâmetros como variância = 17, pepita = 25 e escala = 300 m.

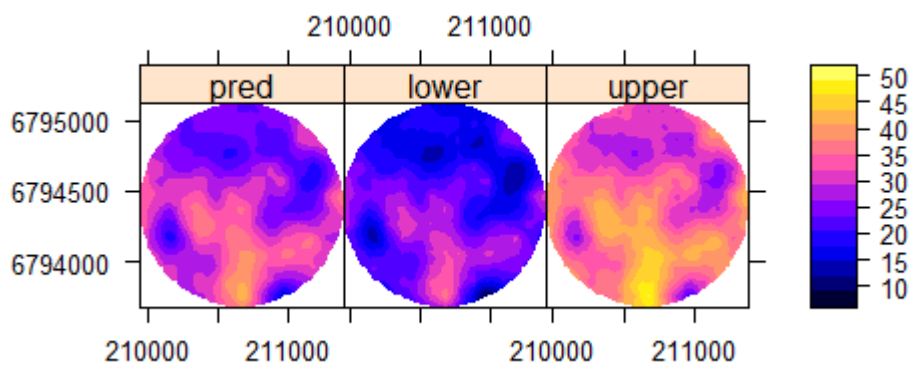


Figura 15. Mapa de Fe_d predito por krigagem ordinária.

Em que pred: valores médios de Fe_d ($g\ dm^{-3}$) preditos, lower: valores mínimos e upper: valores máximos.

APÊNDICE VI - PREDIÇÃO DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (χ_{LF})

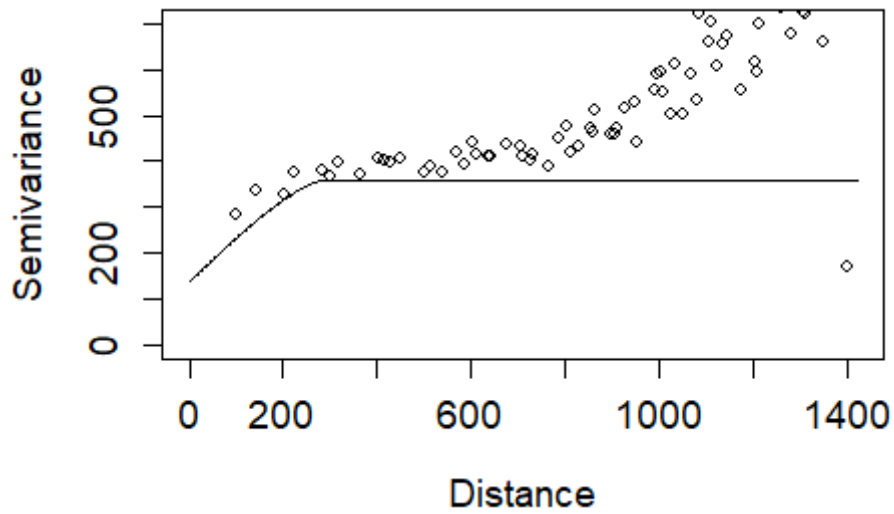


Figura 16. Semi-variograma ajustado com modelo circular, utilizando os parâmetros como variância = 110, pepita = 190 e escala = 250 m.

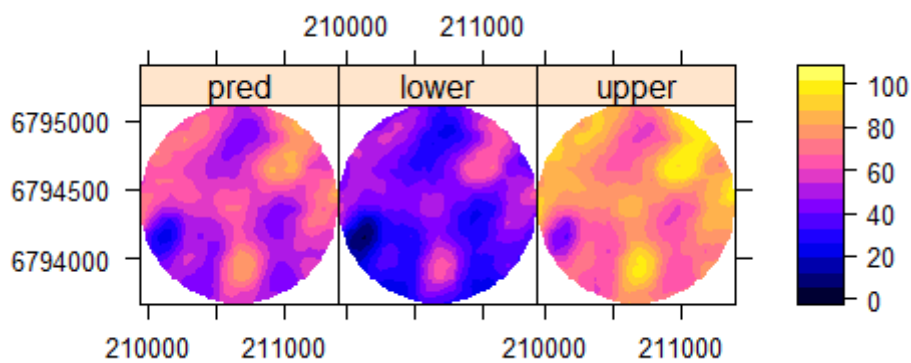


Figura 17. Mapa de χ_{LF} predito por krigagem ordinária.

Em que pred: valores médios de χ_{LF} preditos, lower: valores mínimos e upper: valores máximos.

APÊNDICE VII - PREDIÇÃO DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (X_{HF})

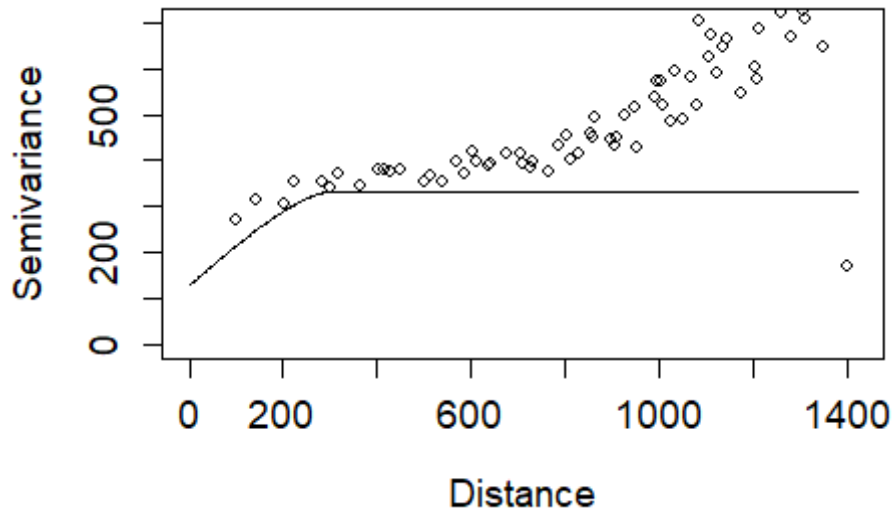


Figura 18. Semi-variograma ajustado com modelo circular, utilizando os parâmetros como variância = 110, pepita = 190 e escala = 250 m.

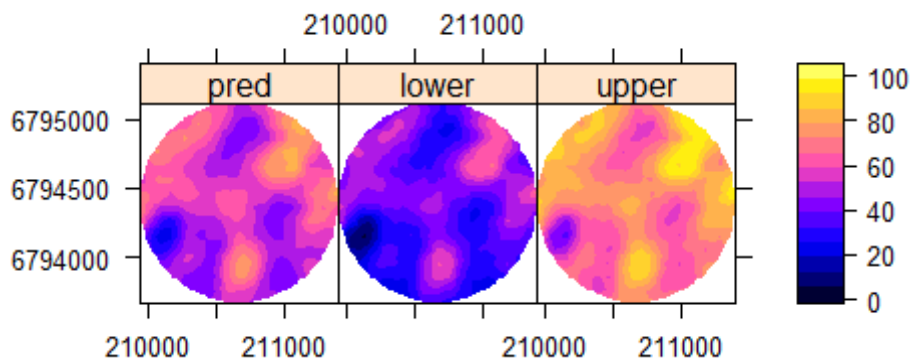


Figura 19. Mapa de X_{HF} predito por krigagem ordinária.

Em que pred: valores médios de X_{HF} preditos, lower: valores mínimos e upper: valores máximos.

DESCRIÇÃO DE PERFIL

PROJETO - Levantamento Tupanciretã

PERFIL N° - 1

DATA - 17/11/20

CLASSIFICAÇÃO - Neossolo Litólico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Município de Tupanciretã, Rio Grande do Sul; -28.948945, -53.972407

CLIMA: Cfa (Subtropical úmido)

SITUAÇÃO E DECLIVE - Perfil descrito em trincheira. 7°, 12% de declividade

FORMAÇÃO GEOLÓGICA - Formação Serra Geral

CRONOLOGIA - Mesozoico (Cretáceo)

MATERIAL ORIGINÁRIO - Rochas Vulcânicas

PEDREGOSIDADE - Pedregoso a muito pedregoso

ROCHOSIDADE - Ausente

RELEVO LOCAL - Plano

EROSÃO - Laminar e sulcos

DRENAGEM - Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Floresta subtropical e subperenifólia

USO ATUAL - Agricultura

DESCRITO E COLETADO POR - Pedron et al.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A	0 – 20 cm; (10 YR 2/2, úmida); franco argilosa; moderada blocos angulares e subangulares pequenos a médios; friável a firme; plástico e muito pegajoso; abrupta e plana; raízes muitas.
R	20 – 30+ cm; maciça médio a grande; muito friável a extremamente friável; não plástico e não pegajoso; raízes poucas.

OBSERVAÇÕES: Horizonte A apresenta fragmentos de saprolito de até 5 cm (maioria duros).

Camada R apresenta elevado fraturamento horizontal e vertical, blocos de até 20 cm que quebram com batidas de picareta e não cortam com a pá.

CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA – Perfil 1

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)			Composição Granulométrica g.kg ⁻¹			Silte/ Argila
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus > 20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina < 2mm	Areia total	Silte	Argila	
A	0 – 20	0	0	100	323	397	280	1,41



DESCRIÇÃO DE PERFIL**PROJETO** - Levantamento Tupanciretã**PERFIL** N° - 2**DATA** - 17/11/20**CLASSIFICAÇÃO** - Planossolo Háplico**LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS** - Município de Tupanciretã, Rio Grande do Sul; -28.947780, -53.973297**CLIMA:** Cfa (Subtropical úmido)**SITUAÇÃO E DECLIVE** - Perfil descrito em barranco de canal de drenagem. Menos que 3% de declividade.**FORMAÇÃO GEOLÓGICA** - Formação Serra Geral**CRONOLOGIA** - Mesozoico (Cretáceo)**MATERIAL ORIGINÁRIO** - Rochas Vulcânicas**PEDREGOSIDADE** - Ausente**ROCHOSIDADE** - Ausente**RELEVO LOCAL** - Plano**EROSÃO** - Não aparente**DRENAGEM** - Mal drenado**VEGETAÇÃO PRIMÁRIA** - Floresta subtropical e subperenifólia**USO ATUAL** - Agricultura**DESCRITO E COLETADO POR** - Moura-Bueno et al.**DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA**

Ap	0 – 15 cm; (10 YR 3/1, úmida); argila; moderada granular muito pequenos a pequenos e blocos subangulares pequenos; friável; ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; clara e plana; raízes abundantes.
A1	15 – 35 cm; (10 YR 2/1, úmida); argila siltosa; moderada blocos subangulares muito pequenos a médios; friável; ligeiramente plástico e pegajoso; clara e plana; raízes comuns.
A2	35 – 50 cm; (10 YR 2,5/1, úmida); muito argilosa; forte blocos subangulares médios a grandes e colunar médios a grandes; muito firme; plástico e pegajoso; clara e plana; raízes poucas.
EA	50 – 67 cm; (10 YR 4/1, úmida); franco argilo-siltosa; moderada blocos subangulares pequenos a médios; firme; plástico e pegajoso; clara e plana; raízes raras.
E	67 – 80 cm; (10 YR 6/2, úmida); franco argilo-siltosa; moderada blocos subangulares pequenos a médios; firme; plástico e pegajoso; clara e plana; raízes raras.

Btg	80 – 110+ cm; (10 YR 4/1, úmida); muito argilosa; forte blocos subangulares pequenos a médios; firme; plástico e pegajoso; raízes raras; mosqueados (10 YR 5/6, úmida).
-----	---

OBSERVAÇÕES: Horizonte Btg com presença de mosqueados (10 YR 4/6, úmida) e estrutura maciça que se desfaz em blocos subangulares.

CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA – Perfil 2

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)			Composição Granulométrica g.kg ⁻¹			Silte/ Argila
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus > 20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina < 2mm	Areia total	Silte	Argila	
Ap	0 – 15	0	0	100	98	373	529	0,70
A1	15 – 35	0	0	100	156	401	443	0,90
A2	35 – 50	0	0	100	51	299	650	0,46
EA	50 – 67	0	0	100	195	416	389	1,06
E	67 – 80	0	0	100	151	554	295	1,87
Btg	80 – 110+	0	0	100	80	332	598	0,13



DESCRIÇÃO DE PERFIL**PROJETO** - Levantamento Tupanciretã**PERFIL** N° - 3**DATA** - 17/11/20**CLASSIFICAÇÃO** - Neossolo Regolítico**LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS** - Município de Tupanciretã, Rio Grande do Sul; -28.943059, -53.966144**CLIMA:** Cfa (Subtropical úmido)**SITUAÇÃO E DECLIVE** - Perfil descrito em trincheira. 4°, 9% de declividade**FORMAÇÃO GEOLÓGICA** - Formação Serra Geral**CRONOLOGIA** - Mesozoico (Cretáceo)**MATERIAL ORIGINÁRIO** - Rochas Vulcânicas**PEDREGOSIDADE** - Ligeiramente pedregoso (0 a 3%)**ROCHOSIDADE** - Ausente**RELEVO LOCAL** - Ondulado**EROSÃO** - Laminar**DRENAGEM** - Bem drenado**VEGETAÇÃO PRIMÁRIA** - Floresta subtropical e subperenifólia**USO ATUAL** - Agricultura**DESCRITO E COLETADO POR** - Moura-Bueno et al.**DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA**

Ap	0 – 5 cm; (5 YR 3/2, úmida); franco argilosa; moderada granular e blocos subangulares muito pequenos a pequenos; solta e friável; plástico e pegajoso; clara e plana; raízes muitas.
A1	5 – 17 cm; (5 YR 3/3, úmida); franco argilosa; forte blocos angulares e subangulares pequenos a grandes; firme, muito firme e extremamente firme; plástico e pegajoso; clara e plana; raízes comuns.
A2	17 – 36 cm; (5 YR 3/4, úmida); franco argilosa; moderada blocos subangulares médios a grandes; friável e firme; plástico e pegajoso; abrupta e plana; raízes comuns.
Cr	36 – 65 cm; transição abrupta e irregular; raízes poucas.
R	65+ cm;

OBSERVAÇÕES: Horizonte A1 possui blocos compactados, extremamente firmes com tamanhos variando de 5 a 10 cm.

Horizonte Cr corta com facilidade com a pá, apresenta-se muito fraturado, com rachaduras de até 0,5 cm preenchidas com solo. A distância entre fraturas

CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA – Perfil 3

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)			Composição Granulométrica g.kg ⁻¹			Silte / Argila
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus > 20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina < 2mm	Areia total	Silte	Argila	
Ap	0 – 5	0	0	100	209	449	342	1,31
A1	5 – 17	0	0	100	241	406	353	1,15
A2	17 – 36	0	0	100	282	382	336	1,13



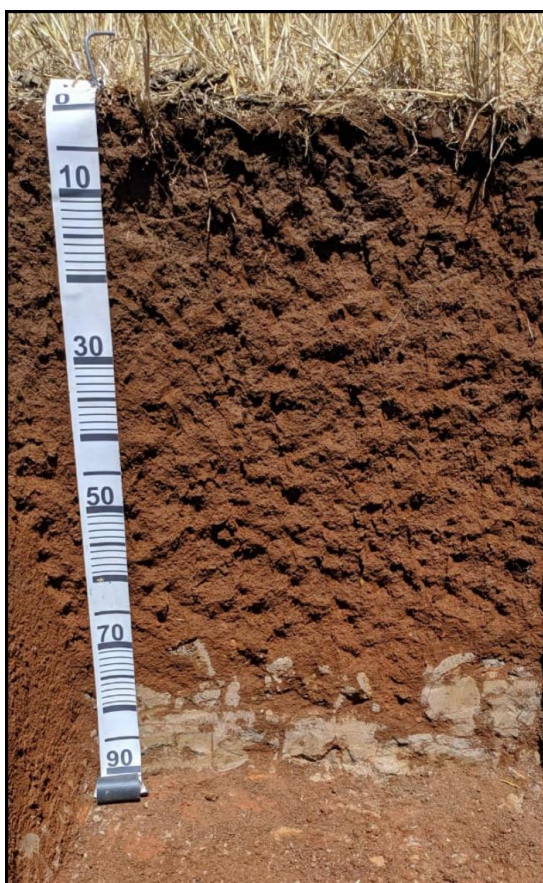
DESCRIÇÃO DE PERFIL**PROJETO** - Levantamento Tupanciretã**PERFIL** N° - 4**DATA** - 17/11/20**CLASSIFICAÇÃO** - Nitossolo Vermelho**LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS** - Município de Tupanciretã, Rio Grande do Sul; -28.941599, -53.968708**CLIMA:** Cfa (Subtropical úmido)**SITUAÇÃO E DECLIVE** - Perfil descrito em trincheira. 7% de declividade**FORMAÇÃO GEOLÓGICA** - Formação Serra Geral**CRONOLOGIA** - Mesozoico (Cretáceo)**MATERIAL ORIGINÁRIO** - Rochas Vulcânicas**PEDREGOSIDADE** - Ausente**ROCHOSIDADE** - Ausente**RELEVO LOCAL** - Suave ondulado**EROSÃO** - Laminar**DRENAGEM** - Bem drenado**VEGETAÇÃO PRIMÁRIA** - Floresta subtropical e subperenifólia**USO ATUAL** - Agricultura**DESCRITO E COLETADO POR** - Pedron et al.**DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA**

Ap	0 – 5 cm; (5 YR 3/2, úmida); franco argilosa; moderada granular muito pequenos a pequenos e blocos subangulares muito pequenos a pequenos; friável a firme; plástico e ligeiramente pegajoso; abrupta e plana; raízes muitas.
A1	5 – 16 cm; (5 YR 2,5/3, úmida); franco argilosa; forte blocos subangulares pequenos a médios; extremamente firme; plástico e pegajoso; clara e plana; raízes muitas.
A2	16 – 38 cm; (5 YR 3/3, úmida); argila; moderada blocos angulares pequenos a grandes e blocos subangulares pequenos a médios; friável a firme; plástico e pegajoso; clara e plana; raízes comuns.
B1	38 – 60 cm; (5 YR 3/4, úmida); argila; moderada blocos angulares e subangulares pequenos a médios; friável; plástico e pegajoso; clara e plana; raízes comuns.
B2	60 – 75 cm (70 – 80 cm); (5 YR 3/4, úmida); argila/muito argilosa; moderada blocos angulares e subangulares pequenos a médios; friável a firme; ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; abrupta e irregular.
Cr	75+ cm (70 – 80+ cm).

OBSERVAÇÕES: Horizontes Bi1 e Bi2 com 1 e 2% de fragmentos de saprólito, respectivamente.

CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA – Perfil 4

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)			Composição Granulométrica g.kg ⁻¹			Silte / Argila
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus > 20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina < 2mm	Areia total	Silte	Argila	
Ap	0 – 5	0	0	100	325	370	309	1,19
A1	5 – 16	0	0	100	293	321	386	0,83
A2	16 – 38	0	0	100	261	328	411	0,79
Bi1	38 – 60	0	0	100	199	278	524	0,53
Bi2	60 – 75	0	0	100	145	254	601	0,42



DESCRIÇÃO DE PERFIL**PROJETO** - Levantamento Tupanciretã**PERFIL** N° - 5**DATA** - 17/11/20**CLASSIFICAÇÃO** – Neossolo Litólico**LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS** - Município de Tupanciretã, Rio Grande do Sul; -28.946810, -53.962950**CLIMA:** Cfa (Subtropical úmido)**SITUAÇÃO E DECLIVE** - Perfil descrito em trincheira. 5° e 10% de declividade**FORMAÇÃO GEOLÓGICA** - Formação Serra Geral**CRONOLOGIA** - Mesozoico (Cretáceo)**MATERIAL ORIGINÁRIO** - Rochas Vulcânicas**PEDREGOSIDADE** - Pedregosa**ROCHOSIDADE** - Ausente**RELEVO LOCAL** - Ondulado**EROSÃO** - Laminar e sulcos**DRENAGEM** - Bem drenado**VEGETAÇÃO PRIMÁRIA** - Floresta subtropical e subperenifólia**USO ATUAL** - Agricultura**DESCRITO E COLETADO POR** - Moura-Bueno et al.**DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA**

A	0 – 15 cm (13 – 17 cm); (10 YR 2/2, úmida); franco argilosa; moderada blocos subangulares pequenos a médios; firme; plástico e pegajoso; abrupta e irregular; raízes abundantes.
R	15 – 40+ cm (13 – 17 cm).

OBSERVAÇÕES: Camada R possui rocha parcialmente alterada, dura, quebra com dificuldade com golpes de picareta. Fraturas de até 2 mm preenchidas com solo. A distância entre as fraturas varia entre 5 a 10 cm.

CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA – Perfil 5

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)			Composição Granulométrica g.kg ⁻¹			Silte / Argila
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus > 20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina < 2mm	Areia total	Silte	Argila	
A	0 – 15	0	0	100	275	462	263	1,75



DESCRIÇÃO DE PERFIL**PROJETO** - Levantamento Tupanciretã**PERFIL N°** - 6**DATA** - 17/11/20**CLASSIFICAÇÃO** - Planossolo Háplico**LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS** - Município de Tupanciretã, Rio Grande do Sul; -28.951371, -53.965578**CLIMA:** Cfa (Subtropical úmido)**SITUAÇÃO E DECLIVE** - Perfil descrito em barranco de canal de drenagem. Menos que 3% de declividade**FORMAÇÃO GEOLÓGICA** - Formação Serra Geral**CRONOLOGIA** - Mesozoico (Cretáceo)**MATERIAL ORIGINÁRIO** - Sedimentos**PEDREGOSIDADE** - Ausente**ROCHOSIDADE** - Ausente**RELEVO LOCAL** - Plano**EROSÃO** - Não aparente**DRENAGEM** - Mal drenado**VEGETAÇÃO PRIMÁRIA** - Floresta subtropical e subperenifólia**USO ATUAL** - Agricultura**DESCRITO E COLETADO POR** - Pedron et al.**DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA**

Ap	0 – 5 cm; (10 YR 2,5/1, úmida); franca; moderada granular e blocos subangulares muito pequenos a pequenos; friável; plástico e pegajoso; abrupta e plana; raízes abundantes.
A	5 – 30 cm; (10 YR 3,5/2, úmida); franco argilo-siltosa; forte blocos angulares médios a grandes; extremamente firme; plástico e pegajoso; clara e plana; raízes muitas.
Btg	30 – 55 cm; (10 YR 4/2, úmida); franco siltosa; moderada blocos angulares a subangulares pequenos a grandes; firme; plástico e pegajoso; clara e plana; raízes comuns; mosqueado (10 YR 4/6, úmida).
Cg1	55 – 75 cm; (10 YR 4/1, úmida); franco argilo-siltosa; moderada blocos angulares a subangulares pequenos a grandes; firme; plástico e pegajoso; clara e plana; raízes poucas; mosqueado (10 YR 4/6, úmida).

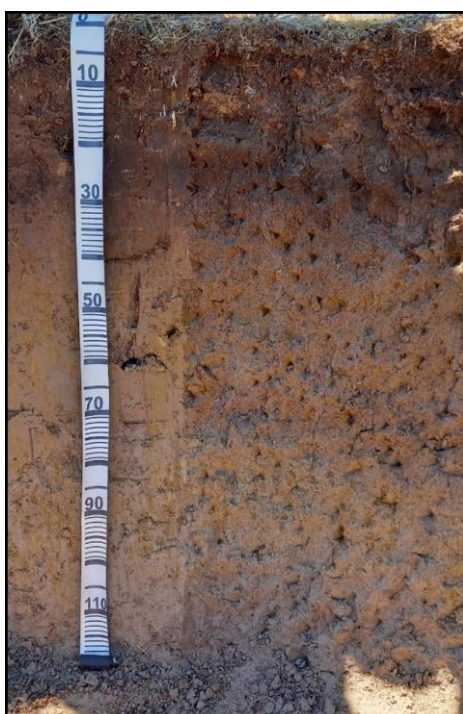
2Cg 1	75 – 100 cm; (10 YR 5/1, úmida); franca; moderada blocos angulares a subangulares pequenos a grandes; friável a firme; não plástico e não pegajoso; clara e gradual; raízes raras; mosqueado (10 YR 5/8, úmida).
2Cg 2	100-120+ cm; (10 YR 6/1, úmida); franco arenosa; maciça; friável; não plástico e não pegajoso; clara e gradual; mosqueado (10 YR 5/8, úmida).

OBSERVAÇÕES: Horizonte A apresenta estrutura modificada por compactação (adensamento).

Horizontes Btg, Cg1, 2Cg1 e 2Cg2 apresentam 2% de fragmento de sílica que variam de 0,5 a 3%.

CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA – Perfil 6

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)			Composição Granulométrica g.kg ⁻¹			Silte / Argila
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus > 20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina < 2mm	Areia total	Silte	Argila	
Ap	0 – 5	0	0	100	297	454	249	1,82
A	5 – 30	0	0	100	189	522	289	1,80
Btg	30 – 55	0	0	100	180	266	555	0,47
Cg	55 – 75	0	0	100	190	498	312	1,59
2Cg1	75 – 100	0	0	100	504	388	108	3,59
2Cg2	100 – 120+	0	0	100	532	342	125	2,73



DESCRIÇÃO DE PERFIL**PROJETO** - Levantamento Tupanciretã**PERFIL N°** - 7**DATA** - 17/11/20**CLASSIFICAÇÃO** – Nitossolo Vermelho**LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS** - Município de Tupanciretã, Rio Grande do Sul; -28.945984, -53.969499**CLIMA:** Cfa (Subtropical úmido)**SITUAÇÃO E DECLIVE** - Perfil descrito em trincheira. 0 a 3% de declividade**FORMAÇÃO GEOLÓGICA** - Formação Serra Geral**CRONOLOGIA** - Mesozoico (Cretáceo)**MATERIAL ORIGINÁRIO** - Rochas Vulcânicas**PEDREGOSIDADE** - Ausente**ROCHOSIDADE** - Ausente**RELEVO LOCAL** - Plano**EROSÃO** - Laminar**DRENAGEM** - Bem drenado**VEGETAÇÃO PRIMÁRIA** - Floresta subtropical e subperenifólia**USO ATUAL** - Agricultura**DESCRITO E COLETADO POR** - Pedron et al.**DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA**

Ap	0 – 8 cm; (5 YR 3/1,5, úmida); franco argilosa; moderada granular muito pequenos e blocos subangulares pequenos; friável; plástico e pegajoso; clara e plana; raízes abundantes.
A1	8 – 20 cm; (5 YR 3/2, úmida); argila; moderada blocos subangulares pequenos a médios; muito friável; plástico e pegajoso; clara e plana; raízes comuns.
A2	20 – 30 cm; (5 YR 3/4, úmida); argila; moderada blocos subangulares pequenos a médios; firme; plástico e pegajoso; gradual e plana; raízes poucas.
A B	30 – 55 cm; (2,5 YR 3,5/4, úmida); argila; moderada blocos subangulares pequenos a médios; firme; ligeiramente plástico e pegajoso; gradual e plana; raízes raras.
B A	55 – 75 cm; (2,5 YR 3/7, úmida); argila/muito argilosa; moderada blocos subangulares pequenos a médios; firme; ligeiramente plástico e pegajoso; gradual e plana; raízes raras.
B1	75 – 105 cm; (2,5 YR 3/8, úmida); muito argilosa; moderada blocos subangulares pequenos a médios; friável; ligeiramente plástico e pegajoso; difusa e plana; raízes raras.

B2	105 – 125 cm; (2,5 YR 3,5/6, úmida); muito argilosa; moderada blocos subangulares pequenos a médios; friável; ligeiramente plástico e pegajoso; difusa e plana; raízes raras.
B C	125+; (2,5 YR 4/6, úmida); argila/muito argilosa; moderada blocos subangulares pequenos a médios; friável; ligeiramente plástico e pegajoso; raízes raras.

CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA – Perfil 7

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)			Composição Granulométrica g.kg ⁻¹			Silte/ Argila
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus > 20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina < 2mm	Areia total	Silte	Argila	
Ap	0 – 8	0	0	100	262	357	381	0,93
A1	8 – 20	0	0	100	233	340	427	0,79
A2	20 – 30	0	0	100	203	326	471	0,69
AB	30 – 55	0	0	100	173	299	528	0,56
BA	55 – 75	0	0	100	141	263	596	0,44
B1	75 – 105	0	0	100	102	194	704	0,27
B2	105 – 125	0	0	100	114	245	641	0,38
BC	125+	0	0	100	136	261	603	0,43



DESCRIÇÃO DE PERFIL**PROJETO** - Levantamento Tupanciretã**PERFIL N°** - 8**DATA** - 17/11/20**CLASSIFICAÇÃO** – Nitossolo Vermelho**LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS** - Município de Tupanciretã, Rio Grande do Sul; -28.948991, -53.964971**CLIMA:** Cfa (Subtropical úmido)**SITUAÇÃO E DECLIVE** - Perfil descrito em trincheira. 6° e 6% de declividade**FORMAÇÃO GEOLÓGICA** - Formação Serra Geral**CRONOLOGIA** - Mesozoico (Cretáceo)**MATERIAL ORIGINÁRIO** - Rochas Vulcânicas**PEDREGOSIDADE** - Ausente**ROCHOSIDADE** - Ausente**RELEVO LOCAL** – Suave ondulado**EROSÃO** - Laminar**DRENAGEM** - Bem drenado**VEGETAÇÃO PRIMÁRIA** - Floresta subtropical e subperenifólia**USO ATUAL** - Agricultura**DESCRITO E COLETADO POR** – Moura-Bueno et al.**DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA**

Ap	0 – 5 cm; (5 YR 3/2, úmida); franco argilosa; moderada blocos subangulares pequenos a grandes; friável e firme; plástico e pegajoso; abrupta e plana; raízes abundantes.
A	5 – 25 cm; (5 YR 3/2, úmida); argila; moderada blocos subangulares pequenos a grandes; friável e firme; plástico e pegajoso; clara e plana; raízes muitas.
AB	25 – 48 cm; (2,5 YR 3/4, úmida); argila; moderada blocos subangulares pequenos a grandes; friável; plástico e pegajoso; gradual e plana; raízes comuns.
BA	48 – 70 cm; (2,5 YR 4/4, úmida); muito argilosa; moderada blocos subangulares pequenos a grandes; friável; plástico e pegajoso; gradual e plana; raízes poucas.
B1	70 – 103 cm; (2,5 YR 3/4, úmida); muito argilosa; moderada blocos subangulares pequenos a grandes; friável; plástico e pegajoso; gradual e plana; raízes raras.

B2	103 – 130 cm; (2,5 YR 3/4,5, úmida); muito argilosa; moderada blocos subangulares pequenos a grandes; friável; plástico e pegajoso; gradual e plana; raízes raras.
B3	130 – 150 cm; (2,5 YR 3/6, úmida); argila; moderada blocos subangulares pequenos a grandes; friável; plástico e pegajoso; abrupta e plana; raízes raras.
Cr	150+ cm.

CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA – Perfil 8

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)			Composição Granulométrica g.kg ⁻¹			Silte / Argila
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus > 20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina < 2mm	Areia total	Silte	Argila	
Ap	0 – 5	0	0	100	250	363	387	0,93
A	5 – 25	0	0	100	189	326	485	0,67
AB	25 – 48	0	0	100	158	343	499	0,68
BA	48 – 70	0	0	100	112	210	678	0,30
B1	70 – 103	0	0	100	85	187	728	0,25
B2	103 – 130	0	0	100	87	283	630	0,44
B3	130 – 150	0	0	100	108	335	557	0,60

