

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**ATRIBUTOS DOS SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL ESTIMADOS POR
ESPECTROSCOPIA DE REFLETÂNCIA DIFUSA E SUSCETIBILIDADE
MAGNÉTICA**

**Priscila Vogelei Ramos
(Tese)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ATRIBUTOS DOS SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL ESTIMADOS POR
ESPECTROSCOPIA DE REFLETÂNCIA DIFUSA E SUSCETIBILIDADE
MAGNÉTICA**

PRISCILA VOGELI RAMOS

Engenheira Agrônoma (UNIPAMPA)

Mestre em Ciência do Solo (UFSM)

**Tese apresentada como
um dos requisitos à obtenção do
Grau de Doutora em Ciência do Solo.**

Porto Alegre (RS) Brasil

Fevereiro de 2019

CIP - Catalogação na Publicação

Ramos, Priscila Vogelei
ATRIBUTOS DOS SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL ESTIMADOS
POR ESPECTROSCOPIA DE REFLETÂNCIA DIFUSA E
SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA / Priscila Vogelei Ramos. --
2019.

74 f.

Orientador: Alberto Vasconcellos Inda.

Coorientador: José Marques Júnior.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS,
2019.

1. função de pedotransferência. 2. óxidos de ferro.
3. cor do solo. 4. magnetismo. I. Inda, Alberto
Vasconcellos, orient. II. Marques Júnior, José,
coorient. III. Título.

PRISCILA VOGELEI RAMOS
Engenheira Agrônoma - UNIPAMPA
Mestre em Ciência do Solo - UFSM


TESE

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOCTORA EM CIÊNCIA DO SOLO

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 26.02.2019
Pela Banca Examinadora



ALBERTO VASCONCELLOS INDA JUNIOR
Orientador-PPG Ciência do Solo

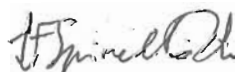
Homologado em: 14.08.2019
Por



CARLOS GUSTAVO TORNOQUIST
Coordenador do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo

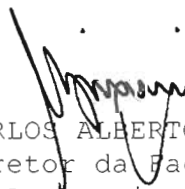


DEBORAH PINHEIRO DICK
Departamento de Físico-Química
UFRGS



LUIZ FERNANDO SPINELLI PINTO
UFPel

DANIEL DE BORTOLI TEIXEIRA
Universidade de Marília



CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade
de Agronomia

*Aos meus pais, José e Carla, por me
fazerem acreditar nos meus sonhos,
aos meus irmãos Paola e José Carlos
por me fazerem ser uma pessoa
melhor e ao meu companheiro
Cleiton, por trilhar o caminho comigo,
dedico.*

AGRADECIMENTOS

À Deus e a Nossa Senhora.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela oportunidade para a realização do doutorado, infraestrutura disponibilizada, oportunidades oferecidas e por todo o conhecimento transmitido.

Ao meu orientador professor Alberto Vasconcellos Inda, pela confiança na condução da pesquisa, disponibilidade e paciência em todos os momentos do curso. Ao meu co-orientador professor José Marques Júnior pela oportunidade de realizar parte do curso na Universidade Estadual Paulista (UNESP) e pela troca de ideias.

Ao meu supervisor do doutorado sanduíche professor Vidal Barrón pelos ensinamentos e pela oportunidade na Universidad de Córdoba (UCO). Aproveito para estender meus agradecimentos aos amigos que fiz no laboratório da UCO, Giovana, Julierme, Elena, Adrian, Daniel, José Maria, Campi, Mari Ángeles, Mercedes e Pepe, pelos momentos de convivência, cafés e almoços compartilhados.

Aos amigos que conheci na UNESP que contribuíram grandemente com suas ideias para a realização deste trabalho, Diego Silva Siqueira e Daniel De Bortoli Teixeira. Estendo o agradecimento para os amigos da mesma instituição, Kathleen, Angélica, Laércio, Renato, Danilo, Ludmila e Ivanildo.

As meninas da “salinha” na UFRGS Tatiele Fruett, Edsleine Ribeiro e Estéfane Chaves pela amizade construída e cumplicidade e as integrantes da salinha que tive pouco tempo de convivência, mas que são pessoas especiais, Jéssica Cavalcante e Letícia Kohn. Estendo também o agradecimento, a minha irmã acadêmica Jessica Oliveira pelo companheirismo e tempos de descontração e a Vanessa Bertolazi pelos momentos compartilhados.

As bolsistas de iniciação científica Antônia pelo apoio técnico e especialmente para a Key que me acompanhou desde o início das minhas atividades de doutorado, tornando-se uma grande amiga e pessoa fundamental para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, José da Silva Ramos e Carla Mey Vogelei Ramos que nunca mediram esforços para me apoiar, para que eu pudesse alcançar meus objetivos.

À minha irmã Paola Vogelei Ramos por encarar junto comigo desafios e ser a melhor “auxiliar de graduação e pós-graduação” que alguém poderia ter. Ao meu irmão José Carlos Vogelei Ramos pelo carinho e atenção.

Ao meu companheiro Cleiton Lixieski Sell pelo apoio, dedicação e incentivo, sendo essencial nesta caminhada.

À equipe que nos anos 80 coletaram as amostras de solos utilizadas neste estudo, representados pelos professores Marino Tedesco e Carlos Alberto Bissani. Estendo meus agradecimentos as colegas Jessica Oliveira e Regina Felisberto que com seus estudos da dissertação me proporcionaram informações importantes para a realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado na UFRGS e doutorado sanduíche no exterior (PDSE).

ATRIBUTOS DOS SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL ESTIMADOS POR ESPECTROSCOPIA DE REFLETÂNCIA DIFUSA E SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA¹

Autora: Priscila Vogelei Ramos

Orientador: Alberto Vasconcellos Inda

RESUMO

O Rio Grande do Sul (RS) possui uma expressiva diversidade de solos. Essa diversidade se evidencia em levantamentos de reconhecimento de solos do Estado e em levantamentos semidetalhados ou detalhados de pequenas áreas ou municípios. No entanto, além dos custos elevados, os levantamentos de solos demandam tempo para as atividades de campo, laboratório e escritório. Como alternativa, algumas técnicas vêm sendo estudadas para a aquisição de informações sobre os atributos dos solos de forma rápida, segura e de custos reduzidos. Nesse contexto, encontram-se as técnicas de espectroscopia de refletância difusa (ERD) e de suscetibilidade magnética (SM). Utilizando essas técnicas, foram realizados três estudos em solos representativos das diferentes regiões fisiográficas do RS, sendo a ERD na faixa do espectro visível e infravermelho próximo explorada no primeiro e segundo estudos e a SM no terceiro estudo. No primeiro estudo objetivou-se comparar curvas espectrais obtidas em espectrofotômetros portátil e fixo. Em adição, investigou-se o desempenho de ambas as curvas para a estimativa de atributos do solo como a granulometria (areia, silte, argila), os teores de carbono orgânico do solo, de Fe relativo aos óxidos de ferro pedogênicos (Fe_d) e de fósforo remanescente. A correlação entre as assinaturas espectrais obtidas nos dois aparelhos variou de 0,94 a 0,98 ($p < 0,01$) ao longo da faixa espectral avaliada. A capacidade preditiva não diferiu entre os aparelhos fixo e portátil. O segundo estudo objetivou determinar e comparar os parâmetros de cor (matiz, valor, croma) e o índice de avermelhamento, utilizando as técnicas da ERD e da caderneta de Munsell, bem como confeccionar um mapa da cor real do solo e determinar a razão Hematita/(Hematita+Goethita) em porcentagem ($Hm/(Hm+Gt) \cdot 100$) dos solos utilizando a ERD. Foi possível visualizar e quantificar as diferenças entre as medições pela caderneta de Munsell e pela ERD, verificando regiões dos parâmetros de cor em que a caderneta superestimou ou subestimou os resultados em comparação a ERD. A razão $Hm/(Hm+Gt) \cdot 100$ indicou uma predominância de solos goethíticos (razão $< 25\%$) no RS e uma menor proporção de solos hematíticos-goethíticos (razão > 50 e $< 75\%$). O terceiro estudo, similar ao primeiro, objetivou avaliar o desempenho da utilização da SM para a predição de atributos do solo como a granulometria, o matiz, a razão $Hm/(Hm+Gt)$, Fe_d e de fósforo remanescente. Os resultados indicaram que a SM pode ser utilizada na estimativa da maioria dos atributos avaliados. Os estudos realizados sugerem que técnicas indiretas como a ERD e a SM possuem potencial como ferramentas adicionais em estudos relacionados a Ciência do Solo.

Palavras-chave: função de pedotransferência, óxidos de ferro, cor do solo, magnetismo.

¹Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (74p.) Fevereiro, 2019.

SOIL ATTRIBUTES OF RIO GRANDE DO SUL ESTIMATED BY DIFFUSE REFLECTANCE SPECTROSCOPY AND MAGNETIC SUSCEPTIBILITY¹

Author: Priscila Vogelei Ramos

Adviser: Alberto Vasconcellos Inda

ABSTRACT

Rio Grande do Sul (RS) has an expressive diversity of soils. This diversity is evident by the soil recognition surveys of the state in semi details or detailed surveys of small areas or counties. However, beyond the expensive cost, the soil surveys demand time for the field, laboratory and office activities. As an alternative, some new techniques have been studied acquisition of information on soils attributes in a fast and lo-cost manner. In this context, the techniques of diffuse reflectance spectroscopy (DRS) and magnetic susceptibility (MS) are been used. Using those techniques three studies were carried out on representative soils of the different physiographic regions of RS, which in the first and second ones, the DRS technique was explored and the third one was made using MS technique. In the first study, it was aimed to compare spectral curves obtained in the portable and fixe spectrophotometers. In addition, it was investigated the performance of the both curves to estimate the soil attributes such as granulometry (sand, silt, clay), total organic carbon, Fe content relative to pedogenic iron oxides and remaining phosphorus. The correlation between the spectral signatures obtained in the two sets was significant, with the coefficient varying between 0.94 and 0.98 over the range evaluated. The predictive capacity did not differ between the both fixed and portable devices. In the second study it was aimed to determine and compare the color parameters (hue, value and chroma) and the reddening index using the DRS and Munsell chart techniques, as well as make a map of the actual soil color and determine the ratio Hematite (Hematite/ Goethite) using the most appropriate technique evaluated. It was possible to visualize and quantify the differences between the measurements obtained by Munsell and DRS technique, verifying the color parameters in which the notation overestimated or underestimated the results comparing to DRS. The ratio $Hm/(Hm+Gt)$ indicate a predominance of goethitics soils (ratio < 25%) in the RS and a minor proportion of Hematitic-goethitics (ratio > 50 e < 75%). The third study, similar to the first one, aimed to evaluate the performance of using the MS to predict soil attributes as granulometry, hue, ratio $Hm/(Hm+Gt)$, the levels of Fe relative to pedogenic iron oxides and remaining phosphorus. The results indicate that MS could be used to predict almost all the soil attributes evaluated in this research. The studies suggest that indirect techniques such as DRS and MS have potential as additional tools in studies related to Soil Science.

Keywords: pedotransfer function, iron oxides, soil color, magnetism.

¹ Doctorate Thesis in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (74p.) February, 2019.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	11
2. ESPECTROSCOPIA DE REFLETÂNCIA DIFUSA EM APARELHOS FIXO E PORTÁTIL E A ESTIMATIVA DE ATRIBUTOS DE SOLOS DO SUL DO BRASIL	15
2.1 Resumo	15
2.2 Introdução	16
2.3 Material e Métodos	18
2.4 Resultados	21
2.4.1 Assinaturas espectrais	21
2.4.2 Predição de atributos do solo	22
2.5 Discussão	24
2.6 Conclusões	27
3. COR DE SOLOS SUBTROPICAIS DO BRASIL DETERMINADAS POR TÉCNICAS TRADICIONAL E ESPECTROSCOPIA DE REFLETÂNCIA DIFUSA	29
3.1 Resumo	29
3.2 Introdução	30
3.3 Material e Métodos	32
3.3.1 Seleção e preparo de amostras	32
3.3.2 Determinação da cor dos solos	33
3.4 Resultados	35
3.5 Discussão	40
3.5.1 Relação entre a cor por caderneta de Munsell e por espectroscopia de refletância difusa	40
3.5.2 Classificação dos solos de acordo com a razão $H_m/(H_m+G_t)$	43
3.6 Conclusões	45
4. SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA NA PREDIÇÃO DE ATRIBUTOS DE SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL	46
4.1 Resumo	46
4.2 Introdução	46
4.3 Material e Métodos	48
4.4 Resultados e Discussão	51
4.5 Conclusões	61
REFERÊNCIAS	62
RESUMO BIOGRÁFICO	72

RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos dos solos separados por conjuntos de calibração e validação.....	22
Tabela 2. Parâmetros obtidos por meio da validação do modelo partial least-squares regression (PLSR).....	23
Tabela 3. Parâmetros de cor separados por solos classificados quanto a proporção dos óxidos de ferro ocorrentes.....	40
Tabela 4. Parâmetros de cor e óxidos de Fe separados por regiões fisiográficas do Rio Grande do Sul, Brasil.....	40
Tabela 5. Estatística descritiva dos atributos dos solos dos conjuntos de calibração e validação.....	52
Tabela 6. Parâmetros da regressão linear dos atributos de solos dos dados gerais com a suscetibilidade magnética.....	52
Tabela 7. Parâmetros da regressão linear dos atributos de solos separados por grupos de classes de solos com a suscetibilidade magnética.....	53
Tabela 8. Parâmetros da regressão linear dos atributos de solos separados por grupos de classes de litologia com a suscetibilidade magnética.....	54
Tabela 9. Raiz do erro quadrático médio (RMSE) e coeficiente de correlação (R^2) estimados a partir da validação externa, com utilização dos atributos do solo selecionados.....	56

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 1. Localização dos pontos de coleta das amostras no Estado do Rio Grande do Sul.....	19
Figura 2. Curvas de refletância obtidas em espectrofotômetros fixo e portátil de cinco classes de solos, classificadas conforme a Soil Taxonomy.....	21
Figura 3. Regiões fisiográficas e distribuição das amostras no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil.....	33
Figura 4. Curva espectral com destaque aos intervalos onde ocorre os minerais goethita e hematita, onde também encontra-se em evidência os parâmetros utilizados na análise do contínuo removível.....	35
Figura 5. Matiz, valor, croma e índice de avermelhamento obtidos pela espectroscopia de refletância difusa e pela caderneta de Munsell e a diferença entre as duas técnicas.....	37
Figura 6. Cor da superfície dos solos do Rio Grande do Sul, Brasil, obtida por espectroscopia de refletância difusa.....	38
Figura 7. Ocorrência de diferentes proporções da razão $Hm/(Hm+Gt)$ dos solos do Rio Grande do Sul, Brasil, obtida por espectroscopia de refletância difusa.....	39
Figura 8. Correlação dos parâmetros de cor matiz, valor e croma obtidos por caderneta de Munsell e por Espectroscopia de Refletância Difusa.....	42
Figura 9. Localização dos pontos de coleta das 198 amostras no Estado do Rio Grande do Sul.....	48
Figura 10. Suscetibilidade Magnética dos solos superficiais do Estado do Rio Grande do Sul.....	57
Figura 11. Na coluna da esquerda estão representados os atributos do solo e sua distribuição espacial com teores mensurados em laboratório, na coluna central são os mesmos atributos extraídos com a fórmula da regressão linear utilizando a suscetibilidade magnética na função de pedotransferência e na coluda da direita, classes de aplicabilidade da suscetibilidade magnética na predição dos atributos.....	59

RELAÇÃO DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPES - Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior

COT - carbono orgânico total

CR - contínuo removível

CV - coeficiente de variação

DP - desvio-padrão

ERD - espectroscopia de refletância difusa

Fe_d - ferro relativo aos óxidos de ferro pedogênicos

Gt - goethita

HG - solo hematítico-goethítico

Hm - hematita

IAV - índice de avermelhamento

MIR - faixa espectral do infravermelho próximo médio

NIR - faixa espectral do infravermelho próximo

P rem - fósforo remanescente

PDSE - doutorado sanduíche no exterior

PLSR - Partial least-squares regression

RGB - tonalidades de vermelho, verde e azul

RMSE - Root Mean-Squared Erro

RPD - Ratio Performance Deviation

RS - Rio Grande do Sul

SiBCS - Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos

SM - suscetibilidade magnética

TFSA - terra fina seca ao ar

UCO - Universidad de Córdoba

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VIS - faixa espectral da região do visível

1. INTRODUÇÃO GERAL

A demanda por mapas de atributos do solo tem aumentado na busca por um melhor aproveitamento do potencial dos solos, podendo ser para o uso, ocupação ou para balizar um planejamento sustentável (ROCKSTRÖM et al., 2009). Para a confecção desses mapas, normalmente é necessário um grande número de amostras, o que requer um tempo maior empregado nas coletas e análises (DEMATTE et al. 2007). As análises rotineiras de laboratório geram resíduos, destroem a amostra, são caras e demoradas. Com o avanço das pesquisas e o desenvolvimento de novas tecnologias, se têm buscado técnicas alternativas que em conjunto com as técnicas tradicionais ou mesmo de forma isolada auxiliam e/ou possibilitam o mapeamento de diferentes propriedades dos solos. Neste contexto, destaca-se as técnicas espectroscopia de refletância difusa (ERD) e a suscetibilidade magnética (SM).

A análise pela técnica da ERD requer uma pequena amostra de solo, algumas gramas, que é colocada diretamente no porta amostras e inserida no espectrofotômetro. No interior do aparelho um feixe de luz é emitido, o qual atinge a amostra de solo. Parte dessa luz é absorvida e outra parte é refletida, conforme a constituição da amostra. O aparelho possui uma esfera de refletância que permite somar todos os feixes de luz refletidos pela amostra. Essa refletância é obtida em diferentes comprimentos de onda, desde o visível até o infravermelho médio, embora a maioria dos equipamentos abranjam somente até o infravermelho próximo. O resultado dessa análise é uma curva espectral, também conhecida como assinatura espectral. Essa curva é formada pela refletância no momento da leitura comparada com um padrão que reflete totalmente a luz incidente (BARRÓN et al., 2000). A princípio o que se pode notar é que amostras de solo mais claro, a refletância é maior, então a curva é mais elevada do que a de solos mais escuros. Porém, essa curva, após tratamentos

matemáticos, pode nos revelar muitas informações sobre a constituição do solo e até mesmo quantificar a cor exata do mesmo (VISCARRA ROSSEL et al., 2010).

Estudos têm utilizado a curva espectral para a elaboração de modelos capazes de prever atributos do solo como a granulometria (areia, silte, argila), o teor de carbono orgânico, a concentração de Fe relativo aos óxidos de ferro (Fe_d) e de metais pesados, entre outros (VISCARRA ROSSEL et al., 2006; BAHIA et al., 2017; CAMARGO et al., 2018; XU et al., 2018). Através da assinatura espectral também é possível determinar a proporção entre os dois óxidos de ferro pedogênicos mais comuns, a hematita (Hm) e a goethita (Gt) ($Hm/(Hm+Gt)$). Essa razão pode ser obtida por meio da segunda derivada da curva (TORRENT; BARRÓN, 2003) ou pelo contínuo removível (CLARK; ROUSH, 1984). Em adição, quando utilizamos a faixa do visível da curva espectral, é possível determinar a cor quantificada real do solo. Para tanto, a faixa que abrange o comprimento de onda do visível é submetida a equações que revelam os valores triestímulos, x, y e z (WYSZECKI; STILES, 1982), os quais são facilmente convertidos em parâmetros de cor (matiz, valor e croma) por meio de um software.

A SM é originada a partir da rotação dos elétrons dos minerais presentes no solo. Como os minerais possuem diferentes características quanto sua espécie e formatos, a SM estimada e denominada de SM resultante, ou seja, que representa o mineral de maior expressão no ambiente (SIQUEIRA, 2013). A atração magnética foi considerada nos primeiros levantamentos de solos (REZENDE et al., 1988), onde por meio de um ímã os pesquisadores diferenciavam os solos originados de rochas máficas de outros materiais de origem. Posteriormente, Daves (1992) determinou a SM por meio de uma balança de precisão adaptada, que media a força de interação entre o ímã e a amostra. Logo depois Dearing (DEARING et al., 1996; DEARING, 1999) apresentaram um susceptímetro como um outro sistema de medição da SM, este que se popularizou no meio científico.

As medidas de SM contribuem para uma melhor compreensão dos processos de formação dos solos, presença de substâncias tóxicas, influência das condições climáticas, do material de origem e da drenagem no solo (SILVA et al., 2010). Comparada a metodologias convencionais, a SM representa um

menor custo, rapidez, segurança e ainda uma ferramenta que não gera resíduos (DEARING et al., 1996). Da mesma forma que a ERD, a SM tem sido utilizada em estudos de predição de atributos de solos. Siqueira et al. (2010) identificaram a SM como boa preditora de propriedades do solo relacionadas a composição e mineralogia de um Typic Haplustalfs. Camargo et al. (2018) utilizaram a SM na construção de modelos de previsão para a determinação de elementos potencialmente tóxicos nos solos.

Outra característica importante que as duas técnicas (ERD e SM) apresentam é a portabilidade dos aparelhos. Quando essas leituras são realizadas em laboratório, possuem o benefício do ambiente controlado. No entanto, há uma necessidade de ir a campo realizar a coleta, preparar a amostra com secagem, moagem, peneiramento e em alguns casos se necessita a homogeneização da amostra para a realização da leitura. No caso da ERD existem alguns equipamentos portáteis, que podem gerar, relativamente, a mesma informação que aparelhos fixos em laboratório (SORIANO-DISLA et al., 2017). Com a SM, é possível utilizar o mesmo aparelho de laboratório para o campo, pois o susceptímetro também pode ser utilizado com bateria e acoplado a diferentes sensores, estes que são adaptados para a utilização em diferentes ambientes, inclusive a campo diretamente no perfil.

Considerando essas duas técnicas, a presente tese contempla a utilização da ERD em dois estudos e a SM em um terceiro. No primeiro estudo utilizou-se dois equipamentos de ERD diferentes, sendo um deles fixo e o outro portátil. Nossa hipótese é que o espectrofotômetro portátil expressa resultados semelhantes aos obtidos com o aparelho fixo, permitindo a predição de atributos do solo com a mesma acurácia. O estudo comparou as curvas espectrais obtidas por ambos os aparelhos em 198 amostras de solos representativos do Estado do Rio Grande do Sul (RS). Também foi avaliado o desempenho para a estimativa dos atributos do solo, tais como a granulometria, teores de carbono orgânico total, Fe relativo aos óxidos de ferro pedogênicos e fósforo remanescente.

No segundo estudo construímos a seguinte hipótese: a análise pela ERD permite estimar os parâmetros de cor dos solos precisamente, bem como expressar a proporção dos óxidos de ferro em solos do RS. Para testar nossa hipótese, o nosso objetivo foi determinar os parâmetros de cor, matiz, valor e

croma, e o índice de avermelhamento (IAV) por ERD e pela caderneta de Munsell (técnica tradicional). Após determinar os parâmetros de cor pelos dois métodos em 579 amostras de solos representativas do RS, foi estimada a diferença percentual, considerando a ERD como técnica padrão para verificar o quanto a caderneta superestimava ou subestimava os valores. Foram confeccionados mapas dos parâmetros de cor e do IAV obtidos por ERD e pela caderneta Munsell, bem como mapas da diferença percentual entre essas metodologias. Em adição, de posse da razão $Hm/(Hm+Gt)$ obtida por ERD, os solos do RS, em suas diferentes regiões fisiográficas, foram classificados em classes de proporção dos óxidos de ferro Gt e Hm, bem como foi confeccionado um mapa do RS relativo a razão $Hm/(Hm+Gt)$.

No terceiro estudo, a hipótese considera que a SM possibilita a predição de atributos dos solos do RS, podendo ser aplicada em diferentes condições de litologia e classes de solo. Para testar a hipótese utilizou-se a SM para a predição da granulometria (areia, silte, argila), matiz do solo, razão $Hm/(Hm+Gt)$, teores de Fe relativo aos óxidos de ferro pedogênicos e de fósforo remanescente. Funções de pedotransferências foram aplicadas no conjunto total de amostras e também em grupos distintos de litologia e classes de solos. Com isso foi avaliada a significância e confeccionados mapas dos atributos com dados reais, dados preditos pela SM, e mapas indicativos de locais onde a SM pode ser utilizada, além do mapa da SM de todo o Estado do RS. Um maior detalhamento das técnicas e suas aplicações serão vistos nos estudos a seguir.

2. ESPECTROSCOPIA DE REFLETÂNCIA DIFUSA EM APARELHOS FIXO E PORTÁTIL E A ESTIMATIVA DE ATRIBUTOS DE SOLOS DO SUL DO BRASIL

2.1 Resumo

As curvas espectrais são importantes indicadoras da constituição do solo e podem ser obtidas de maneira rápida, precisa e com baixo custo, por meio de aparelhos portáteis ou fixos em laboratório. Neste trabalho objetivou-se comparar curvas espectrais obtidas em espectrofotômetros portátil e fixo e também o desempenho de ambas as curvas para a estimativa de atributos do solo, tais como a granulometria, os teores de carbono orgânico total, Fe relativo aos óxidos de ferro pedogênicos e de fósforo remanescente. O modelo quimiométrico utilizado para a predição dos atributos do solo foi a Regressão parcial de mínimos quadrados, onde 75% das amostras foram usadas para a calibração e 25% para a validação. A correlação entre as assinaturas espectrais obtidas nos dois aparelhos variou entre 0,94 e 0,98 ($p < 0,01$) ao longo da faixa avaliada. A capacidade preditiva foi avaliada por três parâmetros, os quais não diferiram entre os aparelhos fixo e portátil. A alta correlação entre as medidas dos instrumentos fixo e portátil aliado aos parâmetros da validação semelhantes para a predição de atributos do solo, demonstram que o equipamento portátil em condições de laboratório pode ser usado com o mesmo poder preditor do equipamento fixo de referência.

2.2 Introdução

Mapas de atributos do solo têm sido utilizados para planejamento estratégico de uso e ocupação de várias atividades na agricultura, políticas públicas, dentre outros. Arias et al. (2018) elaboraram mapas de atributos do solo em 6,3 milhões de ha no Equador, visando a criação de uma base para a implementação e gestão do seguro agrícola. O banco de dados para a elaboração dos mapas foi constituído de medidas e observações a campo, análises em laboratório e interpretação de fotos digitais, sendo todo o processo realizado de maneira tradicional, sem o apoio de técnicas indiretas que permitem inferir os mesmos resultados. Por outro lado, Demattê et al. (2016) utilizaram assinaturas espectrais de 7185 amostras de solo, abrangendo todo território brasileiro, na construção de uma biblioteca espectral, onde foi possível estudar a qualidade dos modelos de predição de atributos químicos e físicos gerados.

O Rio Grande do Sul (RS) possui 281 730,223 km² em sua extensão territorial. É o Estado mais meridional do Brasil e, se caracteriza pela atividade agropecuária, tendo importante contribuição para a produção nacional de grãos (soja, milho e trigo) e carne (IBGE, 2018). A manutenção e mesmo o aumento dos níveis produtivos têm exigido um maior conhecimento dos atributos do solo, suas potencialidades e limitações em diferentes locais, visto que o RS possui uma expressiva diversidade de solos (STRECK et al., 2008). Apesar dos reduzidos recursos econômicos, essa diversidade de solos tem sido investigada, em levantamentos de pequenas e grandes escalas (KLAMT et al., 1997; SANTOS et al., 2011), os quais são importantes para o planejamento racional do uso do solo, para avaliação de terras e escolha de áreas apropriadas para descarte de resíduos. No entanto, além dos custos elevados, os levantamentos de solos demandam tempo para a coleta de amostras no campo e para as análises em laboratório. Como alternativa, algumas técnicas vêm sendo estudadas para a aquisição de informações sobre os atributos dos solos de forma segura, rápida e de custos reduzidos. Nesse contexto, dentre outras técnicas utilizadas destaca-se a espectroscopia de refletância difusa (ERD) (BARRÓN et al., 2000; TORRENT; BARRÓN, 2008).

A ERD é uma técnica amplamente utilizada em estudos na área da medicina (VARDI; NINI, 2008), química (SCHWANNINGER et al., 2011) e física (MILOSEVIC; BERETS, 2002). Nas duas últimas décadas, a ERD tem sido

utilizada em estudos na ciência do solo, auxiliando na estimativa de vários atributos do solo, visando o aumento do número de amostras e/ou substituição das técnicas tradicionais. Xu et al. (2018) obtiveram bons resultados utilizando a ERD na estimativa de dezoito propriedades de solos chineses, dentre elas, os componentes minerais, o teor de água e a distribuição do tamanho de partículas. Em Latossolos cobrindo diferentes superfícies geomórficas no sudeste do Brasil, a ERD foi utilizada para a predição de elementos potencialmente tóxicos (Ba, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb e Zn) (CAMARGO et al., 2018). Em adição, a ERD tem sido fundamental na geração de informações referentes ao tipo e concentração dos óxidos de ferro (BUGGLE et al., 2014) e, conseqüentemente, da coloração do solo (ALMEIDA et al., 2003; MA et al., 2017).

Os espectros da refletância são obtidos de maneira rápida, barata, precisa, não destrutiva e não produzem resíduos. Na ERD uma radiação eletromagnética incide sobre a superfície da amostra, onde, parte é absorvida e parte refletida. No momento em que a radiação é dispersada em todas as direções após a interação com a superfície do material, a soma dos feixes é chamada de refletância difusa. A refletância neste momento é medida e comparada com um padrão que reflete totalmente a luz incidente, de acordo com essa comparação é produzida uma curva, também chamada de assinatura de refletância espectral (BARRÓN et al., 2000; TORRENT; BARRÓN, 2008).

Todos os espectrofotômetros seguem o mesmo princípio, porém diferem quanto ao tamanho e a composição, podendo ainda ser fixos ou portáteis. Os fixos geralmente ocupam um lugar definitivo em laboratório, onde sua estrutura é montada sob condições controladas. Já os portáteis são equipamentos menores, que permitem a leitura tanto em laboratório como a campo. No campo as condições ambientais nem sempre são as mais adequadas, porém há a possibilidade de se realizar um número superior de leituras, em um menor tempo, comparado ao aparelho fixo, além de não ser necessária a coleta do material. Assim, as leituras conduzidas diretamente em campo podem ser complementares àquelas que serão realizadas no laboratório.

O desempenho de espectrofotômetros fixos em laboratório para a predição de atributos do solo, tem sua eficácia reconhecida em diversos estudos (VISCARRA ROSSEL et al., 2006; CAMARGO et al., 2015; BAHIA et al., 2017). Por outro lado, existem poucos estudos que exploram o espectrofotômetro

portátil para o mesmo fim (BEN-DOR et al., 2008; DHAWALE et al., 2015; JI et al., 2016). Estudos que verificam a eficácia para a predição de atributos do solo utilizando assinaturas espectrais de aparelhos fixos e portáteis são ainda mais raros (VISCARRA ROSSEL et al., 2009; FORRESTER et al., 2015; SORIANO-DISLA et al., 2017; HUTENGS et al., 2018).

Conforme descrito, para a geração de mapas de atributos de solos são necessárias técnicas rápidas, precisas, de baixo custo e aplicáveis a campo. Neste contexto, a presente pesquisa objetivou: (i) comparar as assinaturas espectrais de amostras de solos do Rio Grande do Sul obtidas em espectrofotômetros portátil e fixo; e (ii) estimar as frações granulométricas areia, silte e argila, os teores de Fe relativo aos óxidos de ferro pedogênicos, de carbono orgânico total e de fósforo remanescente a partir dos espectros de refletância obtidos em espectrofotômetros portátil e fixo.

2.3 Material e Métodos

Para o estudo foram selecionadas 198 amostras do banco de solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. As amostras foram selecionadas por representar os solos coletados sob vegetação natural em ambientes de mata e pastagem nativa. As amostras coletadas na camada 0,00-0,20 m são provenientes dos solos ocorrentes no Rio Grande do Sul, Brasil, e foram classificadas de acordo com a Soil Taxonomy (USDA, 2014) (Figura 1).

As amostras da fração terra fina seca ao ar (TFSA) ($\varnothing < 2$ mm) foram moídas em almofariz de ágata e analisadas em dois espectrofotômetros: (i) aparelho fixo Cary 5000 UV-Vis-IR, que abrange o comprimento de onda na faixa de 175 a 3300 nm e é equipado com uma esfera integradora para refletância difusa; (ii) aparelho portátil QualitySpec Trek, que abrange a região do visível e infravermelho próximo (350-2500 nm). O instrumento portátil foi utilizado em laboratório, apoiado em uma estrutura para facilitar a troca de amostra. Para fins de padronização, em ambos os aparelhos, os valores de refletância foram obtidos com intervalos de 1 nm na faixa de 380 a 2500 nm.

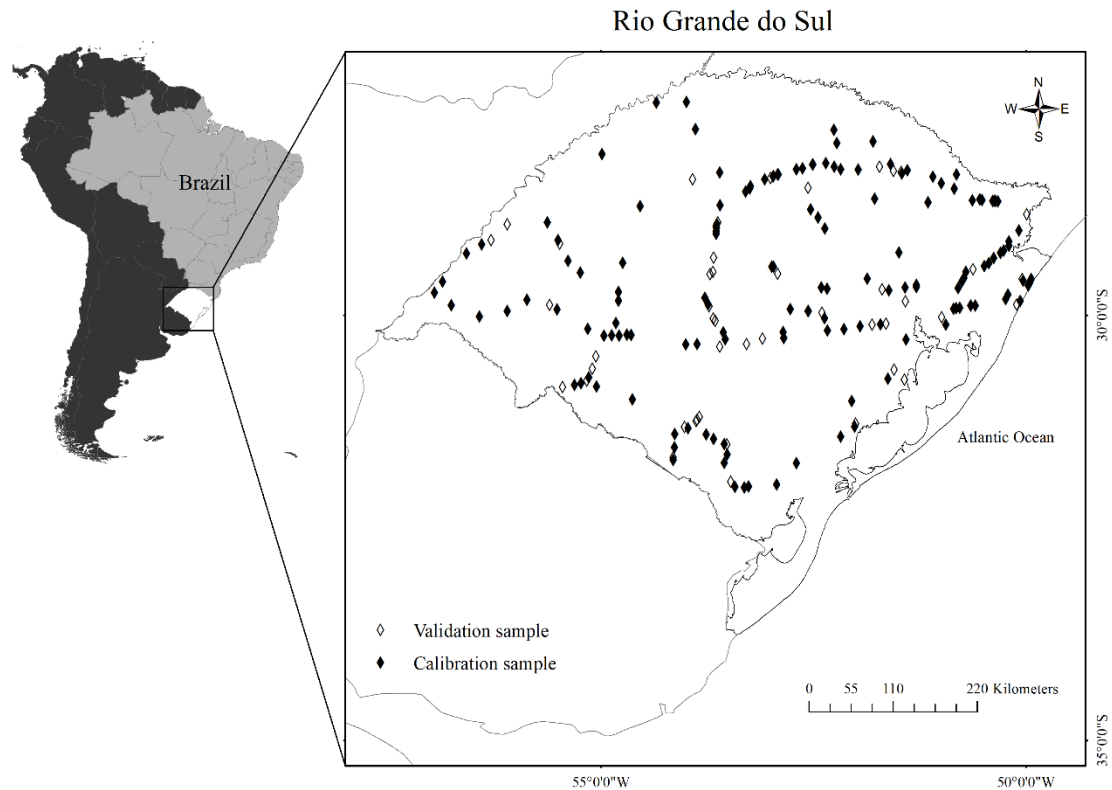


Figura 1. Localização dos pontos de coleta das amostras no Estado do Rio Grande do Sul.

Para as análises em ambos equipamentos foram utilizadas, aproximadamente, 3 g de amostra. No equipamento fixo (Cary 5000 UV-Vis-IR), a leitura foi ajustada para uma duração de 4 min, enquanto no equipamento portátil (QualitySpec Trek) a leitura durou poucos segundos. Em ambos aparelhos utilizou-se pó prensado de Politetrafluoretileno como valor de referência para o branco (padrão). Para ajustar os resultados obtidos de ambos os espectrofotômetros, os valores do aparelho portátil foram multiplicados por 100, pois sua refletância máxima (o branco) é ajustado para a unidade, enquanto no aparelho fixo o ajuste é para 100. Com o intuito de verificar a semelhança do comportamento das curvas espectrais nos dois aparelhos, espectrofotômetros fixo e portátil, foi calculado o coeficiente de correlação das amostras em cada nanômetro da faixa analisada.

As análises de granulometria foram realizadas pelo método do densímetro (TEIXEIRA et al., 2017). O teor de carbono orgânico total do solo (COT) foi determinado em amostras da fração TFSA moídas em gral de ágata. Aproximadamente 0,5 mg de amostra foram submetidas à combustão seca em analisador de carbono SHIMADZU VCSH.

O Fe referente aos óxidos de ferro pedogênicos foi extraído com ditionito citrato bicarbonato de sódio (Fe_d) a 80 °C (MEHRA; JACKSON, 1960). A análise do fósforo remanescente (P rem) foi realizada pela adição de 2 cm³ de TFSA em 20 mL de uma solução $CaCl_2$ 0,01 mol L⁻¹ + KH_2PO_4 60 mg L⁻¹. Após agitação por 5 min, a solução foi mantida em repouso por 16 horas, conforme metodologia descrita por Fink et al. (2016a). A determinação do P rem no extrato foi realizada em espectrofotômetro de emissão óptica de plasma induzido (ICP-OAS).

Para a análise dos dados foi utilizado o programa SigmaPlot versão 14, sendo estimados valores da média, desvio-padrão (DP), coeficiente de variação (CV), assimetria, mínimo e máximo.

Previamente, para a estimativa dos atributos do solo (areia, silte, argila, COT, Fe_d e P rem) por meio dos dados espectrais, os dados obtidos foram separados aleatoriamente em dois conjuntos, calibração e predição. No conjunto de calibração foram utilizadas 75% das amostras ($n_c=149$), enquanto para a validação foram utilizadas 25% das amostras ($n_v=49$). A calibração e validação foram realizadas utilizando o software ParLes 3.1 (VISCARRA ROSSEL, 2008), para os dois conjuntos de espectros, obtidos com aparelho fixo e portátil. Após a conversão da refletância em medições de absorvância por meio da expressão $[\log_{10}(1/Reflectance)]$, também foi aplicada a centralização média como pré-tratamento para refinar a calibração. O modelo utilizado para calibração foi o Partial Least-Squares Regression (PLSR). Os parâmetros selecionados para avaliar a acurácia do modelo foram a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), o coeficiente de determinação ajustado (R^2), e a Relação de Desempenho do Desvio (RPD). Para a avaliação do RPD, os valores foram classificados de acordo com Chang et al. (2001).

2.4 Resultados

2.4.1 Assinaturas espectrais

As curvas espectrais apresentadas na Figura 2, obtidas nos espectrofotômetros fixo e portátil, representam as cinco classes de solos analisadas nesse estudo. Observa-se que os valores obtidos pelo aparelho portátil são inferiores aos obtidos no aparelho fixo. Os solos analisados apresentaram distintas assinaturas espectrais, caracterizadas por diferentes ângulos de curvatura e por bandas com intensidades variadas em determinadas faixas do espectro analisado. Os espectros que expressaram uma menor refletância em relação aos demais, foram os correspondentes ao Oxisol. O mesmo solo apresentou uma maior concavidade nas bandas de absorção entre 450 e 900 nm, sendo esta uma característica que representa a presença dos óxidos de ferro no solo (FONTES; CARVALHO, 2005). Os três locais onde a absorção foi mais intensa podem ser verificados aos 1410, 1920 e 2200 nm. A alta absorção nesses locais são causados pelas vibrações das ligações OH da molécula de água e compostos (XIE et al. al., 2011).

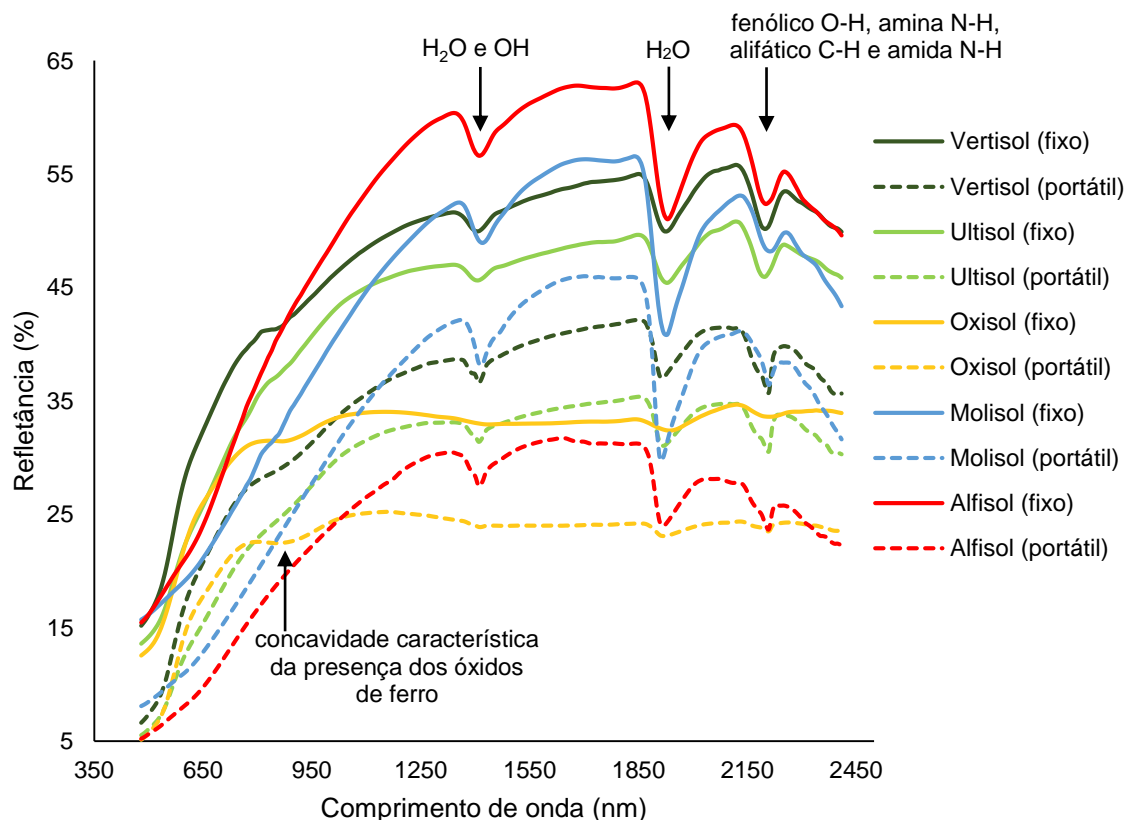


Figura 2. Curvas de refletância obtidas em espectrofotômetros fixo e portátil de cinco classes de solos, classificadas conforme a Soil Taxonomy (USDA, 2014).

A correlação entre os valores obtidos em cada nanômetro do comprimento de onda nos aparelhos fixo e portátil variaram entre 0,94 e 0,98 ($p < 0,01$). Deve-se considerar que as condições de análise em ambiente laboratorial controlado, em amostras possuindo as mesmas características de umidade, tenham contribuído para a forte correlação verificada entre os valores obtidos nos dois aparelhos.

2.4.2 Predição de atributos do solo

A estatística descritiva dos atributos dos solos com conjuntos de calibração e validação dos modelos de predição é apresentada na Tabela 1. Em geral, para ambos os conjuntos amostrais, os parâmetros estatísticos (desvio padrão, coeficiente de variação, e assimetria) expressaram uma alta dispersão dos dados relativos aos diferentes atributos de solos avaliados. As frações granulométricas variaram entre 30 e 950 g kg⁻¹ para a areia, entre 0 e 640 g kg⁻¹ para o silte, e entre 60 e 780 g kg⁻¹ para a argila. A diversidade de atributos dos solos também se expressou nos teores de Fe relativos aos óxidos de ferro pedogênicos (Fe_d), com amplitude entre 0,1 e 103,8 g kg⁻¹ de solo, no conteúdo de carbono orgânico total dos solos (COT), o qual variou entre 0,2 e 16,7 g kg⁻¹ e, nos teores de fósforo remanescente (P rem), que variaram entre 8,4 e 60 mg L⁻¹.

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos dos solos dos conjuntos de calibração e validação.

Parâmetros	Areia	Silte	Argila	Fe _d	COT	P rem
	----- g kg ⁻¹ -----					60 mg L ⁻¹
conjunto de amostras da calibração (N=149)						
Média	440,1	216,9	340,4	23,5	24,3	38,3
Desvio Padrão	251,8	126,5	177,7	24,8	18,8	12,6
Coeficiente de Variação	57,2	58,3	52,2	105,5	77,3	32,8
Assimetria	0,1	0,8	0,6	1,4	2,5	-0,3
Mínimo	30,0	0,0	80,0	0,3	2,0	8,4
Máximo	900,0	640,0	780,0	94,8	102,8	60,0
conjunto de amostras da validação (N=49)						
Média	479,8	231,0	291,0	18,3	16,4	41,6
Desvio Padrão	252,7	141,9	154,7	25,4	8,6	10,7
Coeficiente de Variação	52,7	61,4	53,1	138,7	52,8	25,7
Assimetria	-0,2	0,5	0,9	2,3	0,1	-0,4
Mínimo	30,0	0,0	60,0	0,1	5,2	17,6
Máximo	950,0	580,0	680,0	103,8	29,7	60,0

Fe_d - ferro extraído com ditionito, citrato e bicarbonato sódio; COT- carbono orgânico total; P rem - fósforo remanescente.

Os parâmetros de acurácia da validação do modelo partial least-squares regression (PLSR), calibrado com 75% das amostras de solos (N=149) e validado com o restante das amostras (N=49) são apresentados na Tabela 2. No geral os valores dos parâmetros de avaliação da validação do modelo PLSR mostraram pouca variação entre os aparelhos fixo e portátil.

Tabela 2. Parâmetros obtidos por meio da validação do modelo partial least-squares regression (PLSR).

Atributos	Parâmetros	Instrumento Fixo	Instrumento Portátil	Diferença Relativa (%)
Areia	RPD	1,80	1,84	2,22
	R ²	0,70	0,71	1,01
	RMSE	14,00	13,75	-1,78
Silte	RPD	1,31	1,28	-2,29
	R ²	0,46	0,43	-6,52
	RMSE	10,80	11,07	2,50
Argila	RPD	2,27	2,27	0,00
	R ²	0,80	0,80	0,00
	RMSE	6,83	6,80	-0,43
Fe _d	RPD	2,66	3,12	17,29
	R ²	0,87	0,89	2,29
	RMSE	9,53	8,13	-14,69
COT	RPD	2,01	2,23	10,94
	R ²	0,75	0,80	6,66
	RMSE	1,43	1,27	-11,18
P rem	RPD	1,43	1,55	8,39
	R ²	0,51	0,59	15,68
	RMSE	7,44	6,85	-7,93

N= 49. Fe_d - ferro extraído com ditionito, citrato e bicarbonato sódio; COT – carbono orgânico total; P rem - fósforo remanescente; RPD - Relação de Desempenho do Desvio; R² - coeficiente de determinação; RMSE - Raiz do Erro Quadrático Médio; Diferença relativa=((portátil*100)/fixo)-100.

Nos parâmetros RPD e R², os valores mais elevados indicam melhor predição para os atributos do solo. Considerando Chang et al. (2001), o parâmetro RPD agrupou os atributos em três categorias: (i) categoria A, com valores superiores a 2, que indicaram alta confiabilidade para a predição dos atributos argila, Fe_d e COT; (ii) categoria B, com valores entre 1,4 e 2,0 indicando confiabilidade intermediária para a predição dos atributos areia e P rem e; (iii) categoria C, com valores inferiores a 1,4, indicando baixa confiabilidade para a predição do teor de silte do solo. Os valores de R² variaram entre 0,46/0,43 (fixo/portátil) e 0,87/0,89, com os valores menor e maior sendo verificados novamente para o teor de silte e de Fe_d, respectivamente. Diferentemente dos parâmetros RPD e R² que indicam os valores mais altos como mais adequados

para a predição, no RMSE os menores valores indicam maior precisão das estimativas. Os valores do parâmetro RMSE variaram entre 1,43/1,27 (fixo/portátil) para o atributo COT e 14,00/13,75 para o atributo areia.

A diferença relativa, ou seja, o quanto os parâmetros relativos ao espectrofotômetro portátil variaram positiva ou negativamente em relação ao aparelho fixo (padrão), foi mais evidente com o atributo Fe_d , com diferença de 17,29% do portátil em relação ao fixo no RPD. Na argila os parâmetros representaram um desempenho praticamente igual entre ambos instrumentos, com a diferença relativa variando entre -0,43 e 0%. Considerando os três parâmetros de validação de predição utilizados no estudo, verifica-se que o teor de argila, teor de Fe_d e conteúdo de COT obtiveram os melhores resultados para serem estimados a partir da determinação da espectroscopia de refletância difusa (ERD). Os atributos teor de areia e de P rem obtiveram resultados intermediários, enquanto a predição do teor de silte no solo foi considerada inadequada a partir de ERD.

2.5 Discussão

O solo que menos manifestou refletância foi o Oxisol. Essa expressão ocorre pelo mais alto teor de óxidos de ferro nesta classe de solo. De modo geral, as características de refletância e absorção estão atreladas ao grau de intemperismo. Os solos com maior grau de intemperismo possuem menor intensidade de refletância e a absorção é menos evidente, distinguindo-se de solos menos intemperizados (BAHIA et al., 2017).

Os atributos dos solos expressaram resultados que variaram expressivamente tanto no grupo de calibração, como no grupo de validação. Essa variabilidade é consequência da diversidade litológica no RS e do estágio de intemperismo dos solos, o qual varia conforme as condições climáticas, representadas no RS por amplitudes entre 14 e 20 °C para a normal de temperatura e entre 1,250 e 2,250 mm para a normal de precipitação pluviométrica (MALUF, 2000).

No espectrofotômetro portátil os valores de refletância foram inferiores comparados aos obtidos no aparelho fixo. Em condições de campo esta menor expressão da refletância poderia ser atribuída a presença da umidade, a qual

determina uma maior absorção e, conseqüentemente, menor reflexão (VISCARRA ROSSEL et al., 2009). Entretanto, no presente estudo essa justificativa não procede, considerando que as determinações em ambos os aparelhos foram realizadas em condições controladas de laboratório. É possível que as diferenças observadas sejam devidas as distintas geometrias e ópticas dos equipamentos, e ao fato do aparelho fixo possuir uma esfera de refletância, esta que permite uma detecção uniforme e isotrópica da refletância absoluta.

Os diferentes tipos de solos analisados expressaram distintas assinaturas espectrais. Em geral, as assinaturas espectrais se relacionam com os diferentes componentes do solo que por sua vez são resultados dos diferentes processos de formação do solo, onde menores intensidades de refletância indicam solos em estágios de intemperização mais avançados, como verificado no Oxisol (Figura 2) (DEMATTE; GARCIA, 1999). No mesmo sentido, Fontes e Carvalho (2005) atribuíram diferenças espectrais entre solos na região do visível (450 a 900 nm) aos tipos e concentrações de minerais óxidos de ferro.

A heterogeneidade das assinaturas espectrais dos solos, aliada a um modelo robusto de predição, que utilizou 149 amostras para sua calibração, sugerem uma expressiva confiabilidade para a validação da modelagem em solos representativos da região sul do Brasil (VISCARRA ROSSEL et al., 2006; DEMATTE et al., 2016). Conforme esses autores, é aconselhável que os dados usados para calibrar os modelos possuam amplitudes de variação expressivas para os atributos modelados, o que pode ser constatado na tabela 1. No presente estudo, a amplitude dos atributos físicos, químicos e mineralógicos decorre da diversidade geológica e pedológica constatada em estudos nessa região que investigaram a granulometria e teores de carbono no solo (TORNQUIST et al., 2009; REICHERT et al., 2018), a mineralogia dos óxidos de ferro (KÄMPF; SCHWERTMANN, 1983; FINK et al., 2016b) e a adsorção de P (FINK et al., 2016c; ROGERI et al., 2017).

As altas correlações verificadas ao longo das curvas espectrais obtidas por ambos espectrofotômetros foram, provavelmente, resultado das condições controladas de análise em laboratório. Viscarra Rossel et al. (2009) compararam os espectros obtidos com um espectrofotômetro portátil, em condição de campo e em amostras não tratadas, aos obtidos em laboratório sob condições controladas e em amostras secas ao ar e homogeneizadas. Os

autores verificaram diferenças significativas entre os espectros, principalmente no comprimento de onda infravermelho próximo (780 a 2.500 nm), no qual se expressa a umidade do solo e não ocorrem bandas indicativas de minerais predominantes em solos tropicais e subtropicais como os óxidos de ferro (goethita e hematita).

Na avaliação do potencial da técnica de ERD para a predição de atributos de solos, foram utilizados três parâmetros que indicaram o potencial preditor do modelo. Chang et al. (2001) relacionaram os parâmetros RPD e R^2 , onde o RPD enquadrado na categoria A incluiu propriedades com valores de R^2 medidos em relação ao predito entre 0,80 e 1,00, na categoria B, R^2 entre 0,50 e 0,80 e na categoria C, $R^2 < 0,50$. Considerando esses dois parâmetros, os resultados do presente estudo confirmaram as três classes propostas por Chang et al. (2001), com os atributos argila, Fe_d e COT enquadrados na categoria A; areia e P rem na categoria B; e silte na categoria C.

Em adição ao RPD e R^2 , Bahia et al. (2017) também utilizaram o parâmetro RMSE para a predição de atributos a partir de espectros obtidos em aparelho fixo, e constataram que como no presente estudo os atributos argila (RPD: 3,85; R^2 : 0,91; RMSE: 44,71), Fe_d (RPD: 4,10; R^2 : 0,91; RMSE: 7,71) e carbono (RPD: 1,89; R^2 : 0,79; RMSE: 4,50) demonstraram resultados promissores para a predição desses atributos de solos. Dhawale et al. (2015) também obtiveram resultados semelhantes com aparelho portátil para a predição de areia (R^2 : 0,8; RMSE: 10,7), argila (R^2 : 0,8; RMSE: 9,1) e matéria orgânica (R^2 : 0,6; RMSE: 1,38).

Até o momento poucos trabalhos compararam a predição de atributos de solos utilizando espectrofotômetros fixos e portáteis. Estudos realizados em solos Australianos corroboram com os resultados obtidos no presente trabalho (SORIANO-DISLA et al., 2017). Esses autores testaram quatro instrumentos portáteis na faixa do visível e infravermelho próximo e médio (VIS-NIR-MIR) e compararam com um instrumento fixo MIR/NIR de laboratório como referência, para prever propriedades físicas e químicas de solos. Os autores concluíram que os espectrofotômetros portáteis tiveram desempenho similar ao instrumento de bancada. Resultados semelhantes também foram reportados por Forrester et al. (2015) para a predição do índice de fósforo em solos, por Viscarra Rossel et al. (2009) para a predição do teor de argila dos solos, ambos na Austrália, e por

Hutengs et al. (2018) para a predição do carbono, nitrogênio, pH, areia e argila na Alemanha.

Alguns espectrofotômetros portáteis possuem limitações técnicas, como o tipo de fonte de energia e acessórios de amostragem, porém, se utilizado o equipamento correto, compensa pela possibilidade de se realizar um número superior de leituras, em um menor tempo, comparado ao aparelho fixo, e com precisão similar e em alguns casos melhor do que a do equipamento fixo para estimar atributos do solo (VISCARRA ROSSEL et al., 2009; SORIANO-DISLA et al. 2017).

Neste contexto, os espectrofotômetros portáteis por serem rápidos, precisos, de custo reduzido e por ler uma quantidade superior de amostras de solo em laboratório ou a campo, viabilizam estudos de levantamentos detalhados de solos, separação de unidades pedológicas, geológicas e geomorfológicas e confecção de mapas de atributos do solo.

2.6 Conclusões

Para um mesmo solo, as assinaturas espectrais obtidas por espectrofotômetros fixo e portátil em solos subtropicais do sul do Brasil são semelhantes. As intensidades dos espectros do aparelho portátil são pouco inferiores, porém possuem alta correlação com os espectros do aparelho fixo.

Os solos analisados variam expressivamente quanto aos atributos químicos, físicos e mineralógicos, o que possibilitou desenvolver um modelo robusto de predição.

Os parâmetros de validação do modelo utilizados discriminam o potencial de utilização da espectroscopia de refletância difusa para estimativa de atributos do solo. A refletância dos solos em questão mostra maior confiabilidade para a predição dos teores de argila, ferro relativo aos óxidos de ferro pedogênicos e carbono orgânico total do solo, confiabilidade intermediária para a areia e fósforo remanescente e, baixa confiabilidade para os teores de silte.

A alta correlação entre as medidas dos instrumentos fixo e portátil aliado aos parâmetros da validação semelhantes, demonstram que o equipamento portátil em condições de laboratório tem o mesmo poder estimativo do equipamento referência, o fixo. Esse resultado possibilita a viabilização das

leituras com maior número de amostras em menor tempo e com a mesma veracidade.

3. COR DE SOLOS SUBTROPICAIS DO BRASIL DETERMINADAS POR TÉCNICAS TRADICIONAL E ESPECTROSCOPIA DE REFLETÂNCIA DIFUSA

3.1 Resumo

A cor do solo é uma importante informação que reflete a constituição dos solos e permite sua classificação em diferentes sistemas. Usualmente para a sua determinação é utilizada a caderneta de Munsell, porém com o avanço das pesquisas, têm se procurado obter a cor de forma quantitativa, o que é possível com equipamentos como os espectrofotômetros de refletância. O presente estudo tem por objetivo: (i) determinar os parâmetros de cor (matiz, valor, croma e índice de avermelhamento (IAV)), pela caderneta de Munsell e por refletância, comparando as duas técnicas; (ii) confeccionar um mapa da cor real do solo utilizando a espectroscopia de refletância difusa (ERD); e, (iii) determinar e classificar a razão hematita/(hematita+goethita)*100 ($Hm/(Hm+Gt)$)*100 pela ERD em solos do Rio Grande do Sul (RS). As 579 amostras da camada de 0 – 0,20 m foram homogeneizadas para a determinação da cor utilizando a caderneta e a refletância. Com a determinação da cor foram separados e comparados os parâmetros de cor obtidos pelas duas técnicas. A razão $Hm/(Hm+Gt)$ *100 foi calculada por meio dos espectros de refletância utilizando cálculos do contínuo removível. De acordo com a porcentagem da razão obtida os solos foram classificados em goethíticos (0-25%), goethíticos-hematíticos (>25–50%), hematíticos-goethíticos (>50–75%) e hematíticos (>75–100%). Foi possível verificar as diferenças entre os parâmetros de cor obtidos por ambas as técnicas, determinando regiões em que a caderneta superestimou e/ou subestimou os resultados em comparação a refletância. A estimativa da razão $Hm/(Hm+Gt)$ classificou solos predominantemente goethíticos no RS.

3.2 Introdução

A cor do solo é capaz de revelar informações sobre sua constituição orgânica e mineral. Essa característica morfológica é um fator determinante para expressar a presença da matéria orgânica no solo (VISCARRA ROSSEL et al., 2006; PRETORIUS et al., 2017). Associado à matéria orgânica, os óxidos de ferro e manganês são os principais pigmentantes inorgânicos do solo (BIGHAM et al., 2002; VISCARRA ROSSEL et al., 2010; BAHIA et al., 2015). Esses minerais são responsáveis pelos matizes brunados, amarelados, avermelhados e escuros de solos, conforme os tipos ou associações de tipos dos óxidos de ferro (hematita: 7,5 R – 5 YR; maghemita: 2,5 YR – 5 YR; goethita: 7,5 YR – 2,5 Y; lepidocrocita: 5 YR – 7,5 YR; ferrihidrita: 5 YR – 7,5 YR) (TORRENT et al., 1983; SCHWERTMANN, 1993) e de manganês.

Em solos altamente intemperizados de regiões tropicais e subtropicais, onde a matéria orgânica e os óxidos de ferro têm influência importante no comportamento químico, como processos de adsorção e sorção de elementos químicos (ALMEIDA et al., 2003; FINK et al., 2016b; FINK et al., 2016c), e físico, por meio do efeito sobre a área superficial específica e na definição de classes de drenagem e de resistência dos solos (CARVALHO FILHO et al., 2015; MAZURANA et al., 2017), a obtenção de parâmetros precisos da cor do solo assume destaque. Devido a sua importância como indicadora pedoambiental e de processos pedogenéticos, a cor do solo é uma característica estruturante de sistemas de classificação do solo. No Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS - SANTOS et al., 2018), a cor do solo é definidora de atributos e horizontes diagnósticos e discrimina classes no segundo nível categórico, enquanto no Sistema Americano (USDA, 2014) a cor é característica discriminante no nível de sub grupo.

Para a determinação da cor do solo, usualmente, utiliza-se a caderneta de Munsell (MUNSELL COLOR, 2000), que consiste em comparar um mostruário de cores padronizadas com amostras a serem caracterizadas. A facilidade de uso tornou essa técnica muito difundida e de expressiva importância para a ciência do solo. Porém, como toda a técnica, a caderneta de Munsell apresenta limitações que podem levar a decisões equivocadas, como a necessidade do enquadramento da cor do solo em um número limitado de chips de cores (SHIELDS et al., 1966). Além da subjetividade das técnicas de

correspondência visual, a utilização deste instrumento é dificultada pelas condições de luminosidade e a experiência do observador (TORRENT; BARRÓN, 1993).

A cor do solo tem sido utilizada em funções de pedotransferência, para estimar atributos do solo de difícil aquisição. Em solos do sul da África a cor obtida pela comparação com a caderneta de Munsell permitiu estimar índices de plasticidade do solo (VAN TOL et al., 2016). Embora a definição da cor do solo pela carta de cores tenha possibilitado avanços importantes na Ciência do Solo, mais recentemente, devido ao surgimento e à difusão de novas técnicas, a pesquisa tem aprimorado a definição dos parâmetros da cor. Dentre as novas técnicas, como o uso de smartphones e outros dispositivos móveis (FAN et al., 2017), a espectroscopia de refletância difusa (ERD) tem obtido destaque pela forma rápida e confiável na medição da cor do solo. Sánchez-Marañón et al. (2015) determinaram medidas espectrofotométricas da cor de solos espanhóis em ambientes com ácido sulfúrico para identificar processos ativos de sulfurização. A cor obtida por refletância também foi utilizada no Brasil para estimar o coeficiente de erodibilidade do solo e identificar áreas com diferentes potenciais produtivos (ALMEIDA et al., 2003; DANTAS et al., 2014; DO CARMO et al., 2016; CRUZ et al., 2018), na Austrália para relacionar com a mineralogia (DAVEY et al., 1975), na China para avaliar o conteúdo de matéria orgânica do solo (CHEN et al., 2018) e na Rússia para investigar compostos de ferro (VODYANITSKII et al., 2018).

Comparando a cor do solo obtida pela caderneta de Munsell e pela técnica da ERD em solos de sete países europeus, Sellitto et al. (2007) constataram que as medidas das duas técnicas foram moderadamente correlacionadas, ocorrendo discrepância originadas da iluminação diferente, preparo de amostras, umidade do solo e tamanho de partículas. Os autores indicam a refletância como técnica que fornece dados mais precisos e reproduzíveis, eliminando a subjetividade da observação visual. Nesse sentido, Viscarra Rossel et al. (2010) utilizaram a ERD para mapear a cor dos solos de todo o território australiano. Diante do exposto, nossa hipótese é que a ERD fornece melhor exatidão na determinação da cor do solo, comparada a técnica tradicional com a caderneta de Munsell. Deste modo, com este estudo objetivou-se: (i) determinar os parâmetros de cor, matiz, valor, croma e índice de

avermelhamento, pela caderneta de Munsell e por refletância, comparando as duas técnicas; (ii) confeccionar um mapa da cor real do solo utilizando a técnica melhor avaliada; e, (iii) determinar e classificar a proporção entre os óxidos de ferro pedogênicos hematita e goethita por meio da razão hematita/(hematita+goethita) dos solos.

3.3 Material e Métodos

3.3.1 Seleção e preparo de amostras

Foram selecionadas amostras do banco de solos do Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A utilização de dados legados, como banco de solos ou informações compiladas, estão sendo incentivados uma vez que representam maior consistência e representatividade ao trabalho (BROWN et al., 2006; ARROUAYS et al., 2017). As amostras são representativas dos solos ocorrentes no Estado do Rio Grande do Sul (RS), Brasil. Os solos no RS foram formados a partir de uma diversidade litológica, conforme segue: rochas plutônicas ácidas (granitos) e metamórficas (gnaisses e xistos) na Serra e Encosta do Sudeste (~ 570 Ma); rochas sedimentares (arenitos, siltitos, argilitos) na Depressão Central (~ 299 Ma); rochas vulcânicas ácidas (riolitos) nos Campos de Cima da Serra e rochas vulcânicas básicas (basaltos) no Alto Uruguai, Planalto Médio, Encostas do Nordeste, Missões e Campanha (~140 a 130 Ma); e sedimentos inconsolidados recentes no Litoral (< 2 Ma) (BRASIL, 2016; STRECK et al., 2008) (Figura 3). A densidade amostral foi de uma amostra a cada 487 km² totalizando 579 amostras georeferenciadas da profundidade de 0,00 a 0,20 m. As amostras da fração terra fina seca ao ar ($\varnothing < 2$ mm) foram finamente moídas em almofariz de ágata para as determinações de cor.

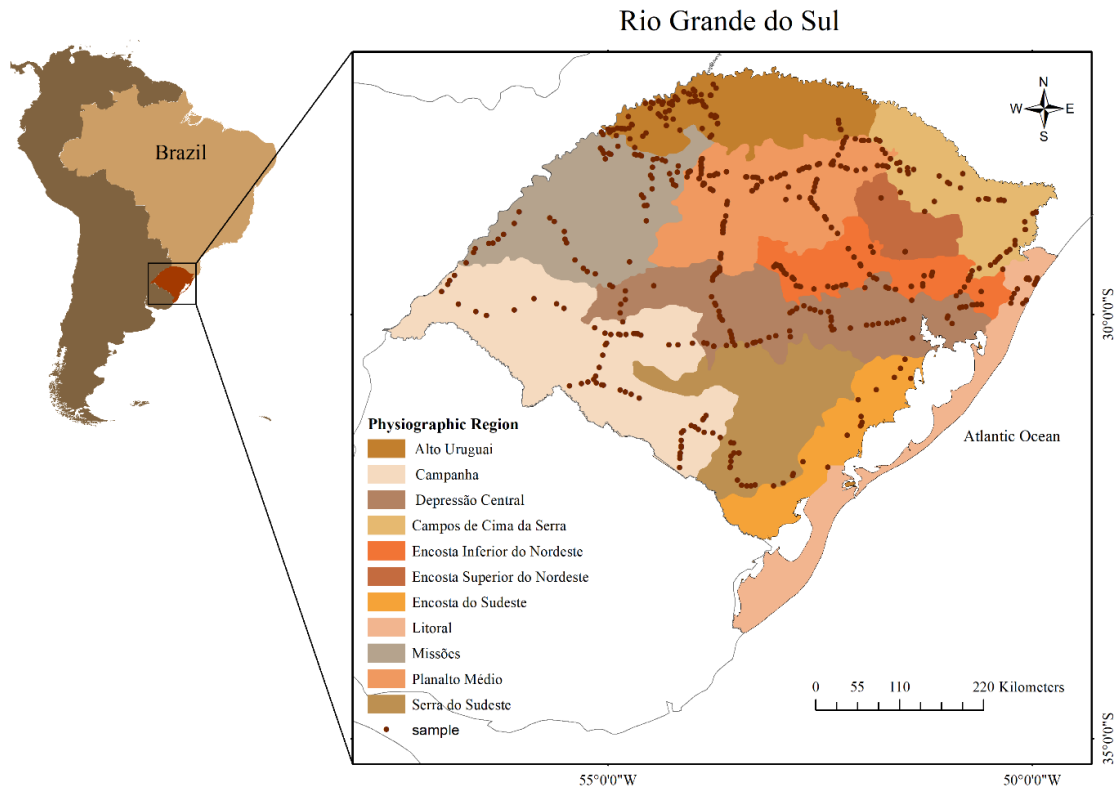


Figura 3. Regiões fisiográficas e distribuição das amostras no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

3.3.2 Determinação da cor dos solos

Para a determinação da cor seca pela caderneta de Munsell (MUNSELL COLOR, 2000), 3 g de amostra foram dispostas sobre um papel branco na superfície de uma mesa, sobre a qual por comparação foram lidos os parâmetros da cor. A luminosidade foi uniformizada utilizando-se uma luz branca em ambiente de laboratório. Foram realizadas leituras por três observadores, sendo a notação da cor (matiz, valor e croma) definida pela média das três observações. Os parâmetros de cor foram convertidos em tonalidades de vermelho, verde e azul (RGB) (software Walkkillcolor) (WALLKILLCOLOR; VAN AKEN, 2019).

As mesmas amostras foram utilizadas para a determinação da cor seca por espectroscopia de refletância difusa (ERD) em um espectrofotômetro Cary 5000 UV–Vis–IR (Varian Inc., Palo Alto, CA), equipado com esfera integradora que acomoda um detector PMT/PbS. As leituras abrangeram a faixa do visível e infravermelho próximo (VIS e NIR), com intervalos de 0,5 nm na faixa espectral de 380 - 2500 nm. Para o cálculo da cor foi selecionada a faixa do visível (350 – 770 nm), onde foi possível obter os valores triestímulos x, y e z

utilizando as equações fornecidas por Wyszecki e Stiles (1982). Esses valores foram convertidos nos parâmetros de cor matiz, valor, croma e RGB. Para aplicar as cores obtidas por ambas as metodologias em mapas, foram utilizadas somente as tonalidades RGB.

Com as tonalidades RGB foram confeccionados separadamente os mapas de matiz, valor, croma e índice de avermelhamento (IAV). O IAV é utilizado em sistemas de notação de cores que permitem utilizar a notação de Munsell para estipular características intrínsecas da cor do solo, como por exemplo prever o conteúdo de hematita (TORRENT et al., 1980). A determinação do IAV foi realizada utilizando a equação de Torrent e Barrón (1993): $IAV = ((10 - Matiz) * Croma) / Valor$.

Para calcular a diferença percentual entre os parâmetros de cor obtidos pela caderneta de Munsell e por refletância, foi utilizada a seguinte fórmula: $Diferença (\%) = ((Munsell - Refletância) / Refletância) * 100$. Onde, a refletância foi utilizada como técnica padrão devido a sua maior sensibilidade ao expressar os valores. Com isso visualizou-se o quanto, em porcentagem, a técnica da caderneta superestimou ou subestimou valores em comparação a técnica padrão, expressando valores positivos e negativos, respectivamente.

Os mapas foram confeccionados utilizando o programa ArcMap 10.4, usando as delimitações das unidades de mapeamento constantes no arquivo digital do Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul (BRASIL, 1973). Em cada unidade de mapeamento foram coletadas quantidades variáveis de amostras, e como cada amostra estava representada por sua cor em RGB, utilizou-se a média dos parâmetros para cada unidade. A ERD foi considerada como a técnica padrão, tendo os parâmetros de cor definidos por essa técnica sido utilizados na elaboração de mapas de matiz, de valor e de croma para a representação da cor real da superfície dos solos do RS.

Por meio dos espectros de refletância também foi possível calcular a razão $(Hematita / (Hematita + Goethita)) * 100$, aplicando os cálculos do contínuo removível (CR). Nessa metodologia são isoladas as características de absorção dos espectros de refletância (CLARK; ROUSH, 1984). Para o cálculo é traçada uma reta entre os picos ocorrentes na banda específica de absorção de cada mineral, a partir disso, divide-se os valores de refletância na banda do espectro (R_b) com os valores correspondentes na reta traçada (R_c), com essas

determinações é possível obter a intensidade da banda de absorção em um determinado comprimento de onda (P_c) (Figura 4). As faixas utilizadas foram 415-450 para a goethita e 535-590 nm para a hematita (SCHEINOST et al., 1998; BAHIA et al., 2015). De acordo com a razão obtida os solos foram classificados em: solos Goethíticos = 0-25%; Goethíticos-Hematíticos = >25-50%; Hematíticos-Goethíticos = >50-75%; Hematíticos = >75-100%.

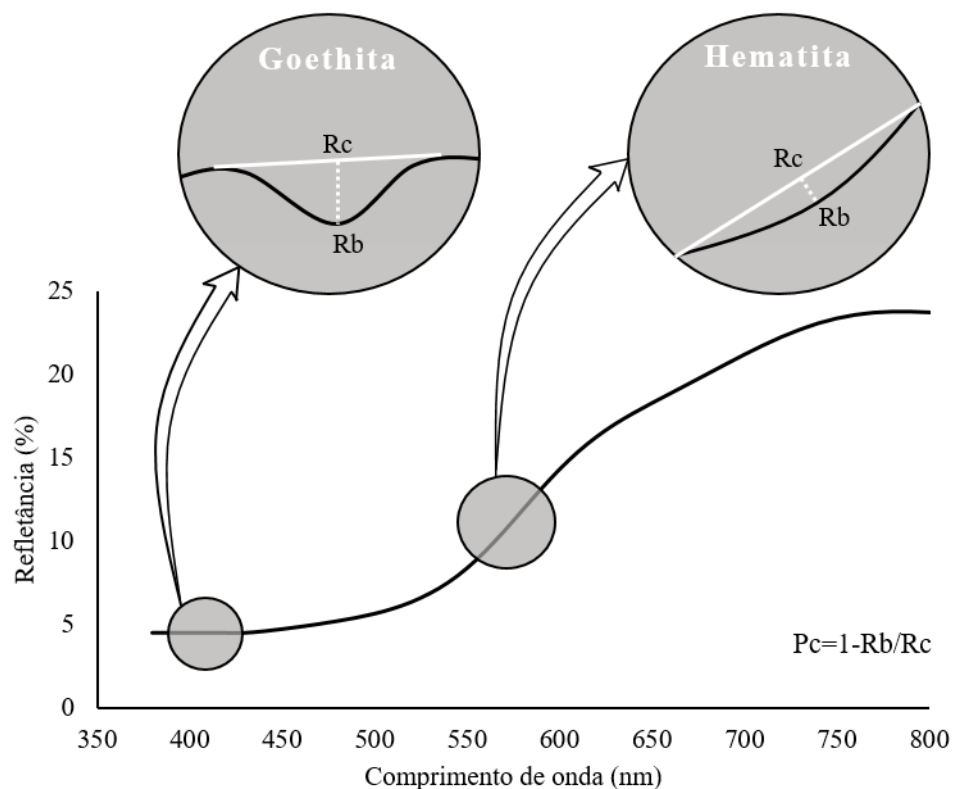


Figura 4. Curva espectral com destaque aos intervalos onde ocorre os minerais goethita e hematita, onde também encontra-se em evidência os parâmetros utilizados na análise do contínuo removível. P_c : profundidade da banda de absorção a um determinado comprimento de onda; R_b : valor da reflectância na banda do espectro; R_c : reflectância correspondente à banda do espectro central contínuo. Adaptado de Fernandes (2017).

3.4 Resultados

Os parâmetros de matiz, valor e croma definidos por espectroscopia de refletância difusa (ERD) foram considerados como valores padrão. Por essa técnica, os parâmetros variaram de 4,7 YR, 6,1 e 6,0 a 10,0 YR, 2,0 e 0,0 para matiz, valor e croma, respectivamente. Pela caderneta de Munsell, esses parâmetros variaram, respectivamente, de 3 YR, 6,0 e 6,0 a 10 YR, 2,0 e 0,0. O

índice de avermelhamento (IAV) variou entre 5,2 a 0,0 pela ERD e 11,7 a 0,0 pela caderneta. As diferenças percentuais entre os parâmetros definidos pelas duas metodologias, para matiz, valor e croma variaram de -26,0 a 30,0%, -35,2 a 5,2%, -44,1 a 49,2% e respectivamente. Já para o IAV, a diferença foi mais expressiva, variando entre -100 e 100+%. As amplitudes dos parâmetros de cor definidos por ambas as técnicas, bem como as diferenças percentuais entre elas, podem ser observadas nos mapas constantes na figura 5.

O mapa da diferença percentual do parâmetro matiz mostrou que a caderneta de Munsell subestimou as tonalidades amarelas, ou seja, definiu matizes menores (mais vermelhos), com destaque para os solos das regiões localizadas ao norte do Estado (Figura 5), onde predomina a litologia basáltica como material de origem. O parâmetro valor foi subestimado pela caderneta nos solos das regiões ao norte e em parte da região da Campanha, também de litologia basáltica (Figura 3). Já para o parâmetro croma, a caderneta de Munsell definiu extremos de superestimativa e subestimativa nos solos da região da Depressão Central e da borda oeste da Serra do Sudeste, onde predominam rochas sedimentares. No mapa diferencial do IAV observou-se a superestimativa pela caderneta Munsell para os solos do Alto Uruguai, Missões, Planalto Médio e Depressão Central, e uma subestimativa nos solos da Serra do Sudeste, Encosta do Sudeste e Litoral.

Com base na subjetividade da definição da notação da cor pela caderneta de Munsell, a metodologia selecionada para a confecção do mapa de cores do Rio Grande do Sul foi a ERD. Deste modo, conforme Viscarra Rossel et al. (2010), selecionou-se os parâmetros obtidos pela refletância, transformando-os em matizes RGB para a elaboração do mapa da cor seca da superfície dos solos (Figura 6).

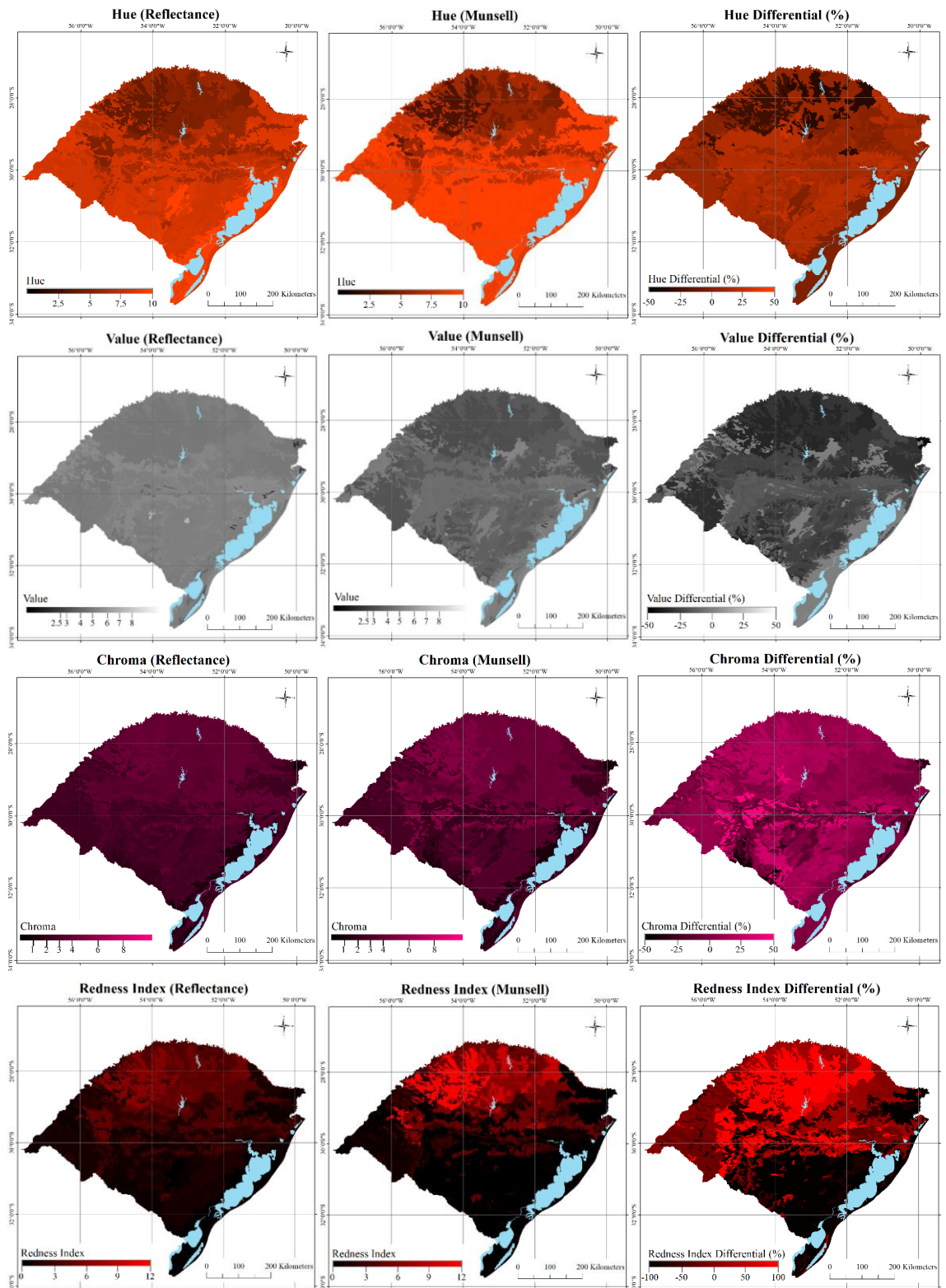


Figura 5. Matiz, valor, croma e índice de avermelhamento (Redness = $((10 - \text{matiz}) * \text{croma}) / \text{valor}$) obtidos pela espectroscopia de refletância difusa e pela caderneta de Munsell e a diferença entre as duas técnicas (Diferença % = $((\text{munsell} - \text{refletância}) / \text{refletância}) * 100$).

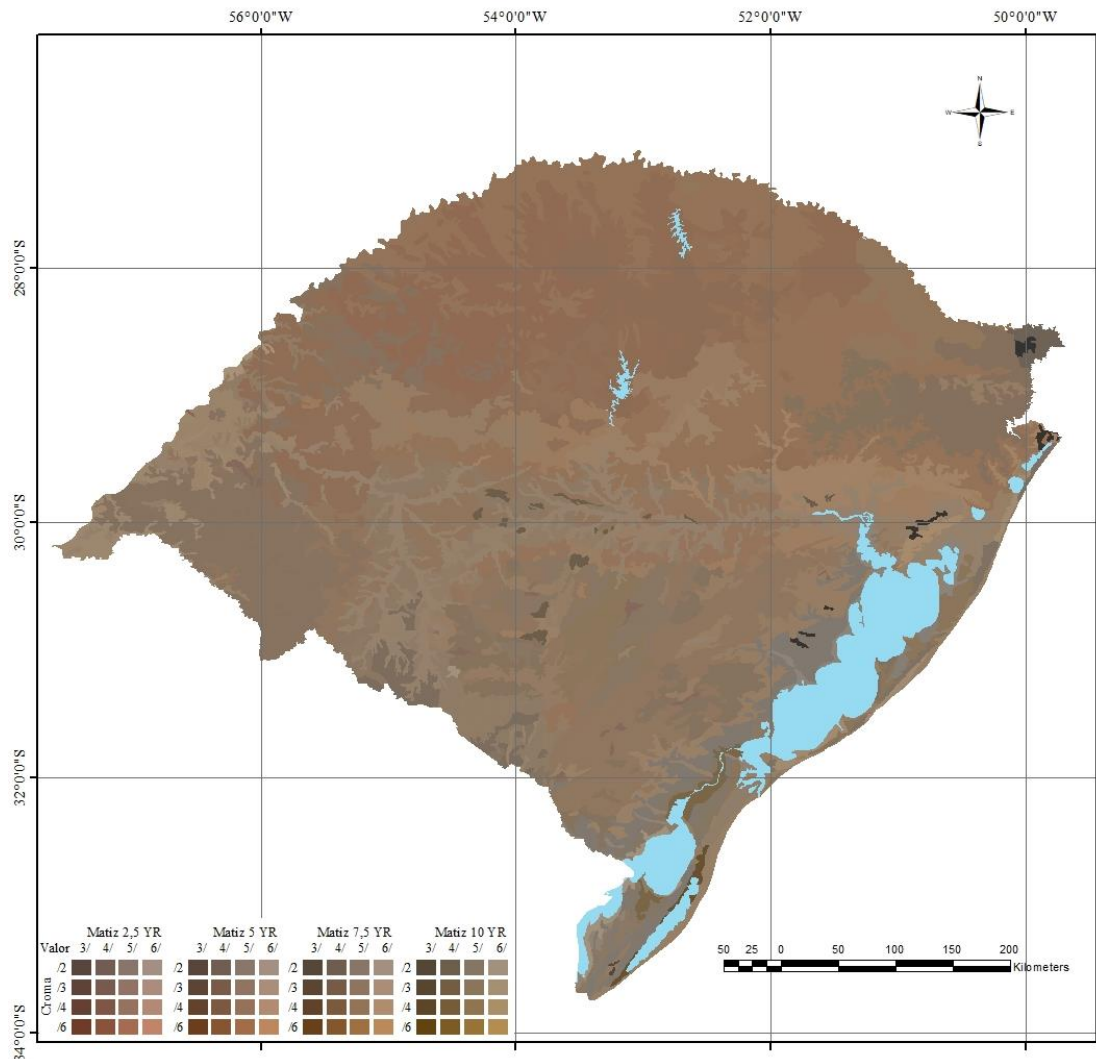


Figura 6. Cor da superfície dos solos do Rio Grande do Sul, Brasil, obtida por espectroscopia de refletância difusa.

Considerando que a hematita e a goethita são os óxidos de ferro mais comuns em solos tropicais e subtropicais (KÄMPF; CURI, 2000; BIGHAM et al., 2002), a proporção entre esses minerais (Razão Hm/(Hm+Gt)) em cada solo também foi definida por ERD (Figura 7). Essa proporção permitiu definir que 20% dos solos são hematíticos, 11% hematíticos-goethíticos, 14% goethíticos-hematíticos e 55% goethíticos. Nos polígonos representados em branco não foi atribuída a razão Hm e Gt. As amplitudes dos valores do matiz, do valor e do croma, e do IAV obtidas pela ERD para todos os solos avaliados são apresentadas na Tabela 3. Conforme mais amarelas dos matizes (4,2 YR para 8,0 YR), observou-se um aumento do valor (4,7 para 5,2) e uma diminuição do croma (4,1 para 3,0). No mesmo sentido, conforme esperado, os valores do IAV diminuíram de 2,1 para 1,0.

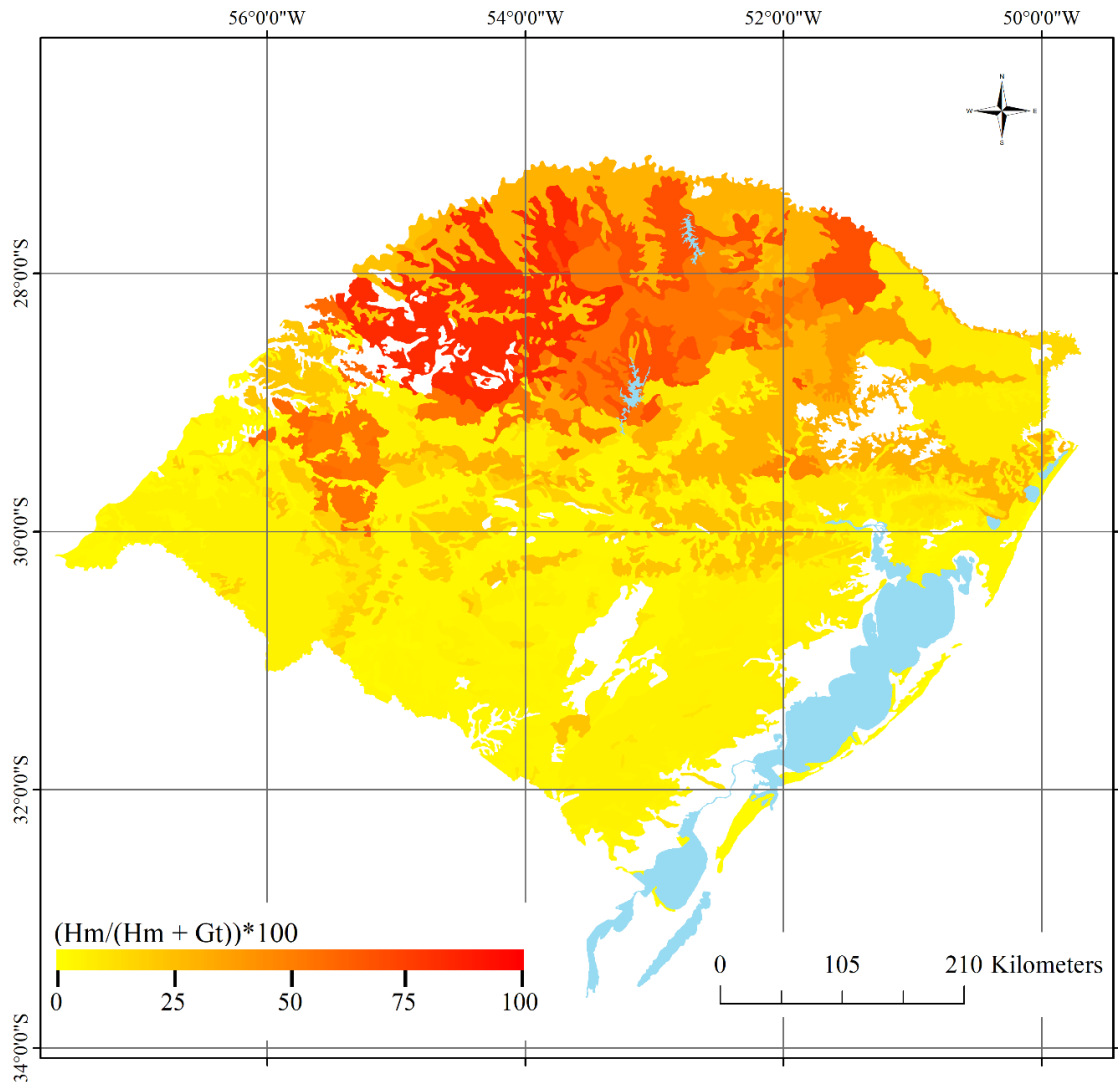


Figura 7. Ocorrência de diferentes proporções da razão $Hm/(Hm+Gt)$ dos solos do Rio Grande do Sul, Brasil, obtida por espectroscopia de refletância difusa. Nos polígonos representados em branco não foi atribuída a razão Hm e Gt .

Essa classificação também foi utilizada para as onze regiões fisiográficas do RS, considerando-se a média da razão $Hm/(Hm+Gt)$ dos solos ocorrentes em cada região (Tabela 4). Assim, o conjunto de solos de três regiões foram classificados como hematíticos-goethíticos, sendo eles das regiões do Alto Uruguai, Missões e Planalto Médio. Os conjuntos de solos das demais regiões foram enquadrados como goethíticos. Nas regiões de solos hematíticos-goethíticos o matiz variou entre 5 YR e 5,9 YR, o valor de 4,8 a 4,9, o croma de 3,5 a 4 e o IAV de 1,6 a 1,9. Nas regiões de solos goethíticos apresentaram valores de matiz entre 7,2 YR e 8,8 YR, o valor de 4,8 a 5,4, o croma de 2,6 a 3,5 e o IAV de 0,7 a 1,2.

Tabela 3. Parâmetros de cor separados por solos classificados quanto a proporção dos óxidos de ferro ocorrentes.

Classificação dos Óxidos de Fe	Médias dos parâmetros de cor				
	matiz	valor	croma	DRS color	IAV
Hematíticos	4,2 YR	4,7	4,1		2,1
Hematíticos-Goethíticos	4,8 YR	4,8	3,9		1,9
Goethíticos-Hematíticos	5,5 YR	4,9	3,8		1,7
Goethíticos	8,0 YR	5,2	3,0		1,0

IAV: índice de avermelhamento; Classificação dos óxidos de ferro: solos Goethíticos = 0-25% da razão Hm/Hm+Gt; solos Goethíticos-Hematíticos = >25–50%; solos Hematíticos-Goethíticos = >50–75%; solos Hematíticos = >75–100%.

Tabela 4. Parâmetros de cor e óxidos de Fe separados por regiões fisiográficas do Rio Grande do Sul, Brasil.

Região Fisiográfica	N	Cor seca				Hm/Hm+Gt	Classif. Óxidos Fe
		Matiz	Valor	Croma	IAV		
Alto Uruguai	83	5,0 YR	4,9	4,0	1,9	65	HG
Campanha	60	8,2 YR	5,1	2,7	0,9	5	Gt
Campos de Cima da Serra	48	7,6 YR	4,8	2,9	1,1	21	Gt
Depressão Central	87	7,2 YR	5,3	3,4	1,2	14	Gt
Encosta do Sudeste	13	8,3 YR	5,4	3,0	0,9	4	Gt
Encosta Inferior Nordeste	62	7,6 YR	5,4	3,5	1,1	10	Gt
Encosta Superior Nordeste	4	7,3 YR	4,9	3,2	1,2	19	Gt
Litoral	14	8,8 YR	5,2	2,6	0,7	4	Gt
Missões	53	5,9 YR	4,9	3,5	1,6	51	HG
Planalto médio	134	5,2 YR	4,8	3,8	1,8	57	HG
Serra do Sudeste	17	8,3 YR	5,1	2,8	0,9	5	Gt

IAV: índice de avermelhamento; HG: solos hematíticos-goethíticos (>50–75% da razão Hm/(Hm+Gt); Gt: solos goethíticos (0-25%).

3.5 Discussão

3.5.1 Relação entre a cor por caderneta de Munsell e por espectroscopia de refletância difusa

A regressão entre os parâmetros matiz, valor e croma obtidos por ERD e pela caderneta expressou valores de R^2 0,91; 0,71 e 0,62, respectivamente (Figura 8). Fernandes et al. (2017) compararam cores obtidas por ERD e pela caderneta de Munsell em solos graníticos do Brasil Central. Os autores verificaram valores de matiz definidos por ambas as metodologias expressaram uma relação de R^2 de 0,83 ($P < 0,001$). Outros estudos que investigaram os parâmetros de cor pelos dois métodos corroboram com os

resultados do presente estudo, com destaque para o trabalho de Viscarra Rossel et al. (2009) com R^2 de 0,71; 0,75; 0,59 ($P < 0,001$), Bonis et al. (2017) com R^2 de 0,95; 0,48; 0,89 ($P < 0,001$) e Spinola et al. (2018) com R^2 de 0,84 ($P = < 0,001$), 0,62 ($P = < 0,05$), 0,13 ($P = 0,67$), para matiz, valor e croma, respectivamente (Figura 8).

No presente estudo a caderneta de Munsell superestimou e subestimou os resultados obtidos pela ERD. O matiz foi subestimado pela caderneta até o matiz seis, superestimando matizes maiores. O valor foi subestimado pela caderneta em relação a ERD e o croma foi subestimado até o croma três, sendo superestimado em cromas maiores (Figura 8). Fernandes et al. (2017) e Spinola et al. (2018) concordam com os resultados obtidos, com o Matiz sendo subestimada até matizes próximas a sete e oito, sendo posteriormente superestimada pela caderneta e, com o valor, sendo subestimado pela caderneta. No parâmetro croma o comportamento predominante de superestimativa da caderneta em relação a ERD foi coerente com os demais estudos analisados (Figura 8).

De acordo com Sellitto et al. (2007) as vantagens da cor obtida pela refletância em relação à caderneta, fornece resultados precisos, sem a subjetividade da observação visual influenciada pela adaptabilidade do olho, o fundo e a iluminação. Além disso, a ERD permite uma maior discriminação dos parâmetros pois leva à determinação de valores intermediários de matiz, valor e croma.

A cor obtida por ERD também foi utilizada como uma alternativa para quantificar fontes de sedimentos em suspensão (MARTÍNEZ-CARRERAS et al., 2010), para derivar grupos de cor do solo como uma nova metodologia que pode auxiliar na classificação técnica do tipo de solo (MOUAZEN et al., 2007).

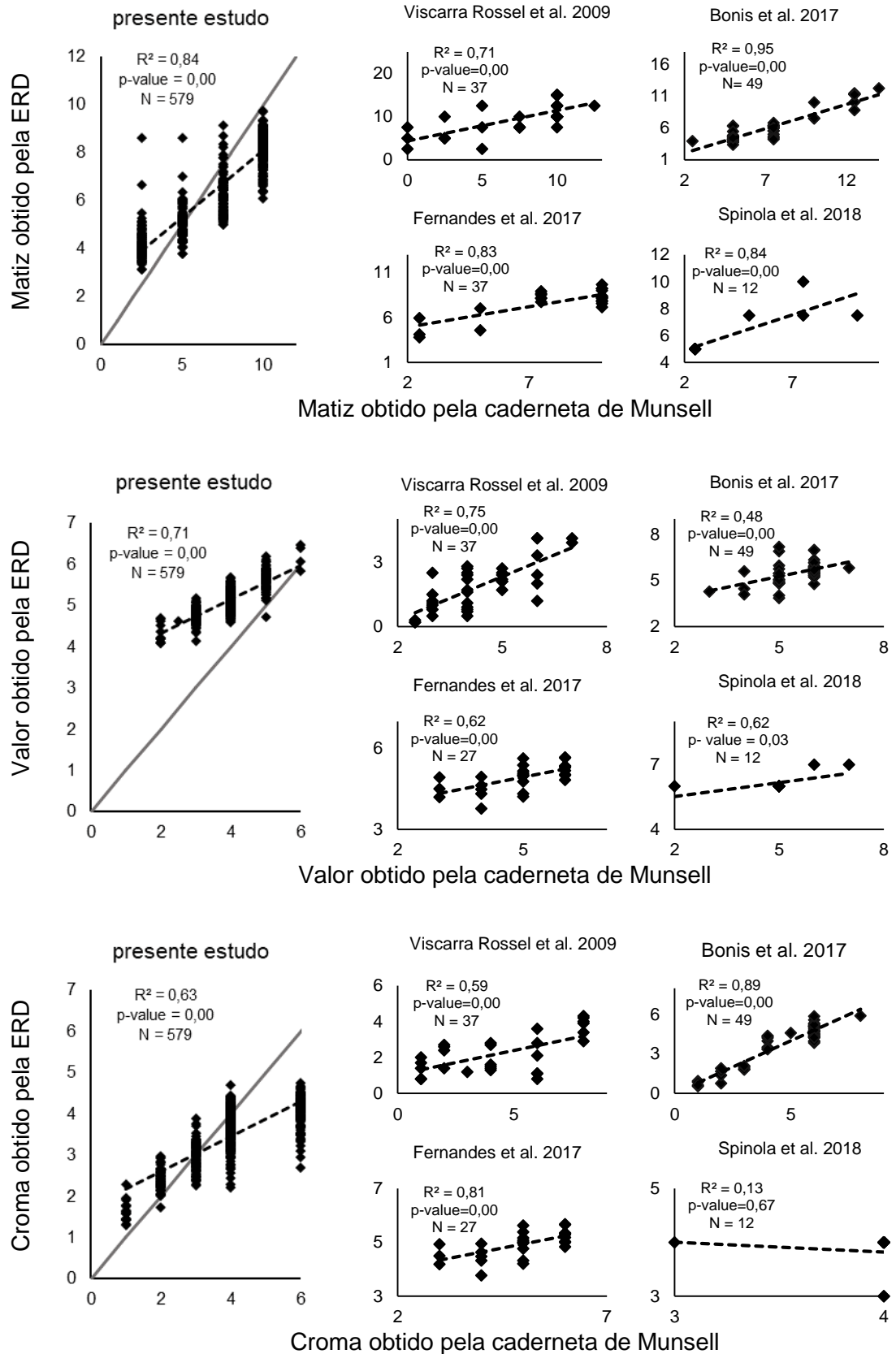


Figura 8. Correlação dos parâmetros de cor matiz, valor e cromas obtidos por caderneta de Munsell e por Espectroscopia de Refletância Difusa.

3.5.2 Classificação dos solos de acordo com a razão $Hm/(Hm+Gt)$

A proporção entre os óxidos de Fe hematita (Hm) e goethita (Gt) (razão $Hm/(Hm+Gt)$) nos solos foi estimada por ERD utilizando a técnica do contínuo removível (Figura 4). Aquino et al. (2016) estimaram a concentração de Hm e Gt por ERD e por difração de raios-x (técnica consolidada como padrão), onde obtiveram relação positiva entre os métodos para a concentração de Hm ($r = 0,78$; $P < 0,01$) e de Gt ($r = 0,98$; $P < 0,01$). Bahia et al. (2015) compararam o tempo requerido para estimar a razão $Hm/(Hm+Gt)$ utilizando diferentes metodologias e constataram que a difração de raios-x necessitou 55 h e 30 min de análise, enquanto que aplicando o contínuo removível foi possível obter a mesma razão em 20 min. Os autores perceberam que embora as proporções de Hm estimadas por ERD tenham sido um pouco superiores, as diferenças não foram significativas.

Considerando as regiões fisiográficas do RS, as análises por ERD indicaram uma predominância de solos goethíticos, com menor ocorrência de solos hematítico-goethíticos. Dentre os principais fatores responsáveis pela proporção entre esses óxidos de ferro nos solos estão o clima (por exemplo: temperatura, precipitação pluviométrica, evapotranspiração), o teor de matéria orgânica, a concentração de Fe no material de origem e o grau de intemperização dos solos (SCHWERTMANN; TAYLOR, 1977; KÄMPF; CURTI, 2000; BIGHAM et al., 2002).

Kämpf e Schwertmann (1983) relacionaram os fatores ambientais com a razão $Hm/(Hm+Gt)$ em uma climosequência basáltica no RS. Ao longo de um transeto de 600 km locado no sentido leste - oeste do Estado, constataram um aumento da razão $Hm/(Hm+Gt)$ do leste em direção ao oeste. Considerando o mesmo material de origem dos solos, as maiores proporções de goethita no leste ($Hm/(Hm+Gt)=0,20$) foram relacionadas com a menor temperatura e evapotranspiração, e maior precipitação, as quais determinaram uma maior acumulação de matéria orgânica nos solos. O aumento constante da razão ao longo da climosequência em direção ao extremo oeste do Estado ($Hm/(Hm+Gt)=0,95$) foi relacionado ao gradiente positivo de temperatura e evapotranspiração, e negativo de precipitação, os quais determinam menor acúmulo de matéria orgânica nos solos, favorecendo a formação de hematita nos solos em detrimento da goethita. Estudos em solos desenvolvidos de

diferentes litologias no RS observaram predomínio de goethita em solos desenvolvidos de rochas ígneas ácidas (granitos e riolitos) e de rochas sedimentares (arenitos), enquanto a proporção de hematita foi maior em solos formados de rochas ígneas básicas (basalto) (CANER et al., 2014; MAZURANA et al., 2017).

No presente estudo, os solos da maioria das regiões foram classificados como goethíticos (razão $Hm/(Hm+Gt) < 25\%$). Em grande parte, isso se deve ao baixo teor do elemento Fe nas rochas, como por exemplo nos granitos e gnaisses que predominam na Serra do Sudeste, nas rochas sedimentares da Depressão Central; e nos sedimentos inconsolidados recentes do Litoral e de parte da Encosta do Sudeste. Na região dos Campos de Cima da Serra, além do baixo teor de Fe nos riolitos, a expressiva predominância da goethita se deve a maior precipitação média e menor temperatura médias anuais registradas no Estado (MALUF, 2000; CANER et al., 2014). As maiores proporções de hematita nos solos das regiões do Alto Uruguai, Missões e Planalto Médio, classificados como hematíticos-goethíticos (razão $Hm/(Hm+Gt) > 50-75\%$), estão relacionadas à litologia basáltica com alto teor de Fe em sua composição, bem como ao avançado desenvolvimento dos solos pelo alto regime hídrico e altas temperaturas (KÄMPF; SCHWERTMANN, 1983; MALUF, 2000; CANER et al., 2014).

Os solos também foram classificados como goethíticos nas regiões da Campanha e Encostas Inferior e Superior do Nordeste do RS, onde embora o material de origem seja basalto, o grau de intemperização e formação dos solos é menos intenso. No caso da Campanha, isso se deve a menor precipitação e maior evapotranspiração médias anuais, resultando em uma menor quantidade de água disponível para lixiviação; enquanto nas regiões de Encosta, isso se deve ao relevo declivoso que favorece o escoamento superficial. Em ambos os casos, a menor taxa de liberação de Fe pelo intemperismo favorece a formação de goethita em detrimento da hematita (KÄMPF; CURI, 2000; BIGHAM et al., 2002).

3.6 Conclusões

É possível quantificar as diferenças entre os parâmetros de cor (matiz, valor e croma) obtidos pela caderneta de Munsell e pela espectroscopia de refletância difusa, determinando regiões em que a caderneta superestima e/ou subestima os resultados em comparação a espectroscopia de refletância difusa.

A técnica de espectroscopia de refletância difusa permite a confecção de mapas dos parâmetros de cor e da cor real de cada tipo de solo, sendo uma importante base de informação para estudos futuros que tenham interesse em relacionar a cor com toda e qualquer informação referente aos solos e sua formação.

A espectroscopia de refletância difusa permite a estimativa da proporção dos óxidos de ferro hematita e goethita (razão $Hm/(Hm+Gt)$) em solos. Essa estimativa classifica os solos da maioria das regiões fisiográficas do Rio Grande do Sul como goethíticos ($Hm/(Hm+Gt) < 25\%$) e de três regiões como hematíticos-goethíticos ($Hm/(Hm+Gt) > 50-75\%$).

4. SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA NA PREDIÇÃO DE ATRIBUTOS DE SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL

4.1 Resumo

As demandas globais por informação de solos têm conduzido investigações que adotam meios para estimar atributos do solo de forma rápida e eficaz. Neste contexto, a suscetibilidade magnética (SM) tem ganhado destaque por ser uma técnica capaz de estimar outros atributos de mais difícil aquisição. Neste trabalho objetivou-se: (i) avaliar o desempenho da suscetibilidade magnética, para a predição de teores de areia, silte, argila, matiz, razão Hematita/(Hematita+Goethita), teor de Fe referente aos óxidos de ferro pedogênicos e fósforo remanescente; e (ii) elaborar mapas da suscetibilidade magnética, atributos do solo e atributos preditos pela suscetibilidade magnética no Estado do Rio Grande do Sul. Para testar o potencial da SM como uma técnica preditora, utilizou-se a regressão linear para a obtenção da equação de pedotransferência. As equações foram obtidas para o grande grupo e também para diferentes grupos de classes de solos e litologia. A SM foi capaz de prever a maioria dos atributos de solos analisados. A predição realizada em grupos distintos de classes e litologia discriminaram os atributos que a suscetibilidade magnética melhor estimou.

4.2 Introdução

O conhecimento dos solos e suas potencialidades são de interesse global. No percurso de exploração consciente do recurso solo, mapas detalhados de solos tornam-se importantes para balizar o planejamento sustentável (CIAMPALINI et al., 2015). A variabilidade espacial de atributos do

solo tem sido uma informação relevante para várias aplicações, como indicadora de degradação ambiental (LEMOS FILHO et al., 2017), áreas com diferentes potenciais de produção (YAO et al., 2014; SIQUEIRA et al., 2016; BEHERA et al., 2018), impacto de atividades antrópicas (ROSEMARY et al., 2017), dentre outras.

Para a elaboração de mapas de atributos do solo normalmente faz-se necessário um número expressivo de amostras, o que requer um tempo maior de coleta e análises em laboratório. Uma das alternativas é o uso de dados legados, o que proporciona uma maior consistência e representatividade ao trabalho (BROWN et al., 2006; ARROUAYS et al., 2017). Outra opção em investigações em ciência do solo é o desenvolvimento de metodologias que permitam a predição de atributos do solo (GRUNWALD et al., 2015). Neste contexto, a suscetibilidade magnética (SM) tem sido explorada, dentre outras aplicações, para caracterizar a variabilidade dos atributos dos solos, por ser uma tecnologia que não utiliza reagentes químicos, rápida, eficaz, não destrutiva (PINGGUO et al., 2016) e, dependendo do sensor, pode ser realizada em ambiente de laboratório ou a campo.

A SM além de ser adotada corriqueiramente nas áreas da arqueologia (TANG et al., 2018) e do paleomagnetismo (IZQUIERDO-LLAVALL et al., 2018), na ciência do solo também tem se mostrado como uma técnica importante para delimitar compartimentos da paisagem (RAMOS et al., 2017), avaliar as condições da solução do solo (OWLIAIE; NAJAFI GHIRI, 2018), a qualidade do solo (LIZAGA et al., 2019), discriminar classes de solos (AYOUBI et al., 2018) e classes de drenagem (ASGARI et al., 2018). Ademais, alguns trabalhos indicam a SM como uma técnica indireta capaz de estimar com alta confiabilidade o conteúdo de argila, porosidade, teor de água, capacidade de troca catiônica, saturação de bases, fósforo adsorvido, concentrações de carbono, conteúdo de hematita, concentração de óxidos de ferro e o conteúdo de elementos tóxicos no solo (SIQUEIRA et al., 2010; CAMARGO et al., 2018; LIU et al., 2018). Neste contexto, os objetivos desta pesquisa foram: (i) avaliar o desempenho da utilização da suscetibilidade magnética, para a predição de teores de areia, silte, argila, matiz, razão Hematita/(Hematita+Goethita), teor de Fe referente aos óxidos de ferro pedogênicos e fósforo remanescente; e (ii) elaborar mapas do

estado do Rio Grande do Sul com a distribuição da suscetibilidade magnética, dos atributos analisados e dos atributos preditos.

4.3 Material e Métodos

Foram utilizadas 198 amostras referentes aos solos de mata e pastagem nativa, estas que foram separadas aleatoriamente em grupos de calibração (75%) e validação (25%). Essas amostras são provenientes do banco de solos do Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, contemplando grande parte do território do Rio Grande do Sul (RS) (Figura 9). As amostras foram coletadas na profundidade de 0,00 à 0,20 m, sendo os solos classificadas de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (SANTOS et al., 2018).

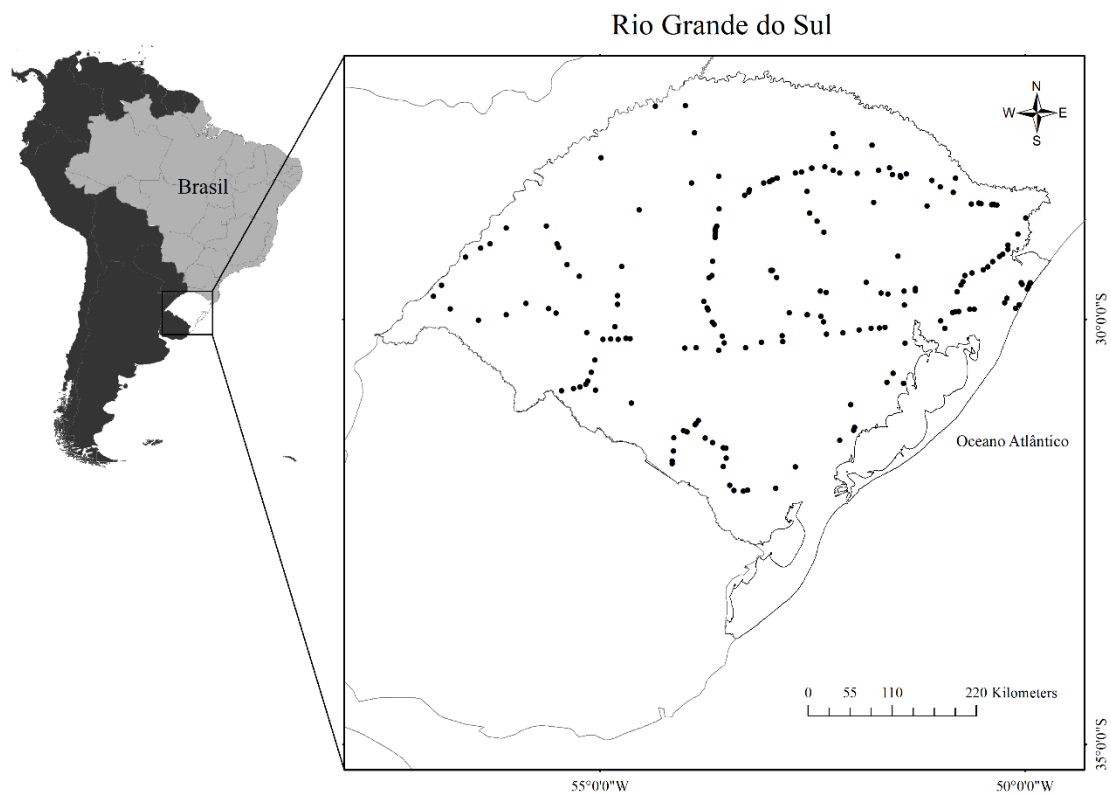


Figura 9. Localização dos pontos de coleta das 198 amostras no Estado do Rio Grande do Sul.

Neste conjunto das 198 amostras além de ser determinada a suscetibilidade magnética (SM), também foram analisados atributos que possuem relação direta ou indireta com a SM. Nas frações areia, silte e argila, podem ocorrer quantidades variáveis de minerais ferrimagnéticos, como a

magnetita nas frações areia e silte e a maghemita na fração argila (DEARING, 1999). O teor de ferro referente aos óxidos de ferro pedogênicos (Fe_d) podem expressar diferentes comportamentos magnéticos, com predominância do ferrimagnético com a maghemita. O parâmetro de cor matiz foi selecionado por apresentar estreita relação com a presença dos óxidos de ferro, sendo a hematita responsável pelas tonalidades vermelhas e a goethita pelas tonalidades amarelas (TORRENT et al., 1983). Os minerais hematita e goethita possuem comportamento antiferromagnético (DEARING, 1999). A sorção do fósforo, que neste estudo foi avaliada com o fósforo remanescente (P rem), está relacionada com o conteúdo e cristalinidade dos óxidos de ferro, como a hematita e goethita que possuem comportamento antiferromagnético e a maghemita (BARRÓN; TORRENT, 1996).

Na fração terra fina seca ao ar (TFSA) foram analisadas a distribuição granulométrica, o teor de Fe_d e o teor de fósforo remanescente (P rem). Na fração TFSA moída em almofariz de ágata foram realizadas as análises de SM e de espectroscopia de refletância difusa (ERD), esta última para a obtenção do parâmetro de cor matiz e da razão e Hematita/(Hematita+Goethita) (Hm/(Hm+Gt)).

As análises de granulometria foram realizadas pelo método do densímetro (TEIXEIRA et al., 2017). O Fe_d foi extraído com ditionito citrato bicarbonato de sódio a 80 °C (MEHRA; JACKSON, 1960). A análise do P rem foi realizada pela adição de 2 cm³ de TFSA em 20 mL de uma solução CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ + KH₂PO₄ 60 mg L⁻¹. Após agitação por 5 min, a solução foi mantida em repouso por 16 horas, conforme metodologia descrita por Fink et al. (2016a). A determinação do P rem no extrato foi realizada em espectrofotômetro de emissão óptica de plasma induzido (ICP-OAS). A SM foi determinada utilizando 2 cm³ de amostra em um susceptímetro MS2 da Bartington acoplado a um sensor de laboratório MS2B em baixa frequência (0,47 kHz) (DEARING, 1994).

A análise por ERD foi realizada em um espectrofotômetro Cary 5000 UV-Vis-IR (Varian Inc., Palo Alto, CA), equipado com esfera integradora que acomoda um detector PMT/PbS. As leituras abrangeram a faixa do visível e infravermelho próximo (VIS NIR), com intervalos de 0,5 nm na faixa espectral de 380 - 2500 nm. Para a obtenção do matiz foi selecionada a faixa do visível (350 - 770 nm), onde foi possível obter os valores triestímulos x, y e z utilizando as

equações fornecidas por Wyszeccki e Stiles (1982). Esses valores foram convertidos em matiz (software Wallkillcolor) (WALLKILLCOLOR) (VAN AKEN, 2019). Para a obtenção da razão $Hm/(Hm+Gt)*100$, aplicou-se os cálculos do contínuo removível (CR) (CLARK; ROUSH, 1984) utilizando as faixas espectrais de 415-450 para a Gt e 535-590 nm para a Hm, de acordo com Scheinost et al. (1998).

Para a análise dos dados foi utilizado o programa SigmaPlot versão 14, sendo estimados valores da média, desvio-padrão (DP), coeficiente de variação (CV), assimetria, mínimo e máximo.

Para testar o potencial da SM como uma técnica preditora dos teores de areia, silte, argila, matiz, razão $Hm/(Hm+Gt)$, Fe_d e P rem, os dados obtidos foram separados aleatoriamente em dois conjuntos, calibração (75% das amostras ($n_c=149$)) e predição (25% das amostras ($n_v=49$)). Utilizou-se uma regressão linear para a obtenção da equação de pedotransferência, tendo como parâmetros de avaliação do modelo de calibração o coeficiente de determinação (R^2), e a significância com o valor de P. A acurácia das estimativas foi verificada por meio do R^2 e da estimativa da raiz do erro quadrático médio (RMSE) (equação 1) aplicado ao conjunto de dados de validação.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{pred,i})^2}{n}} \quad (1)$$

em que, n é o número de valores estimados, $X_{obs,i}$ é o valor observado no ponto i, e $X_{pred,i}$ é o valor predito do atributo no ponto i. Menores valores de RMSE estão relacionados a uma maior acurácia entre as estimativas.

As análises de regressão entre os valores de SM e os demais parâmetros de solos foram realizadas utilizando o programa SigmaPlot 14.0. Primeiramente, as regressões foram realizadas para o conjunto denominado dados gerais, nas amostras para a calibração do modelo (N=149). Posteriormente, as regressões foram realizadas por grupos de amostras separadas por classes de solo e litologia. Considerando as classes de solo foram separadas em quatro grupos conforme segue: (grupo 1) Latossolos + Nitossolos, (grupo 2) Argissolos + Plintossolo, (grupo 3) Luvisolos + Chernossolos + Cambissolos + Vertissolos + Neossolos, e (grupo 4) Gleissolos + Planossolos; e em cinco grupos formados considerando a litologia de origem conforme segue: (grupo 1) Andesito + Basalto, (grupo 2) Granito + Gnaisse + Riodacito, (grupo 3)

Arenito + Conglomerado, (grupo 4) Argilito/Folhelho + Siltito, e (grupo 5) Sedimentos Costeiros Recentes.

Para a visualização da distribuição dos valores de SM e dos demais atributos de solos no RS, foram confeccionados mapas com os valores reais da SM e dos valores reais e estimados dos atributos de solo que expressaram significância na regressão utilizando a SM. Os mapas foram confeccionados utilizando o programa ArcMap 10.4, usando as delimitações das unidades de mapeamento constantes no arquivo digital do Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul (BRASIL, 1973).

4.4 Resultados e Discussão

A estatística descritiva dos atributos dos solos com conjuntos de calibração e validação dos modelos de predição é apresentada na Tabela 5. Em ambos os conjuntos amostrais, os parâmetros estatísticos expressaram uma alta dispersão dos dados. As leituras de suscetibilidade magnética (SM) expressaram valores de 0,1 a $443,9 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. As frações granulométricas variaram entre 3 e 95% para a areia, entre 0 e 64% para o silte, e entre 6 e 78% para a argila. Os teores de Fe relativos aos óxidos de ferro pedogênicos (Fe_d) expressaram uma amplitude de 0,1 à $103,8 \text{ g kg}^{-1}$ de solo, o matiz variou de 3,4 à 9,7 YR, a razão Hm/Hm+Gt de 0,1 à 95,5% e os teores de fósforo remanescente (P rem) de 8,4 à 60 mg L^{-1} . Essa amplitude dos resultados verificada nos conjuntos de calibração e validação, está relacionada a diversidade litológica, geomorfológica e climática do RS.

O atributo que mostrou melhor desempenho para a predição foi o Fe_d , seguido pela razão Hm/Hm+Gt, matiz e os teores de argila na análise dos dados gerais e predominantemente nos grupos de classes de solo e litologia (Tabela 6). O parâmetro R^2 indica os valores mais altos como mais adequados, os atributos que expressaram um R^2 menor foram os teores de areia e P rem, no entanto com significância ($P < 0,001$) para os dados gerais. O único atributo que não teve significância nos dados gerais e também nos grupos de classes de solos e litologia foi o teor de silte (Tabela 7 e Tabela 8).

Tabela 5. Estatística descritiva dos atributos dos solos dos conjuntos de calibração e validação.

Parâmetros	SM x10 ⁻⁷ m ³ kg ⁻¹	Areia ----- % -----	Silte ----- % -----	Argila ----- % -----	Fe _d g kg ⁻¹	Matiz YR	Hm/ Hm+Gt %	P rem 60 mg L ⁻¹
conjunto de amostras da calibração (N=149)								
Média	39,9	46,9	21,0	32,0	21,1	7,3	17,6	39,5
Desvio Padrão	73,2	2,1	12,7	17,5	24,6	1,5	22,8	12,3
CV	183,3	53,5	60,7	54,6	116,6	20,8	129,7	31,1
Assimetria	3,0	-0,1	0,6	0,7	1,69	-0,6	1,7	-0,2
Mínimo	0,1	3,0	0,0	6,0	0,1	3,8	0,1	8,4
Máximo	443,9	95,0	57,0	78,0	103,8	9,7	95,5	60,0
conjunto de amostras da validação (N=49)								
Média	45,2	39,0	25,2	35,2	25,1	7,2	23,6	38,1
Desvio Padrão	74,2	24,6	13,4	16,7	26,1	1,7	27,2	12,5
CV	164,2	63,1	53,3	47,4	104,0	23,6	115,1	32,8
Assimetria	2,8	0,3	0,8	0,5	1,3	-0,6	1,2	-0,5
Mínimo	0,6	7,0	2,0	10,0	2,5	3,4	1,5	10,5
Máximo	398,5	84,0	64,0	73,0	88,2	9,3	95,5	56,9

CV – coeficiente de variação; Fe_d - ferro extraído com ditionito, citrato e bicarbonato sódio; P rem - fósforo remanescente.

Tabela 6. Parâmetros da regressão linear dos atributos de solos dos dados gerais com a suscetibilidade magnética.

atributo	equação	R ²	P
areia (%)	areia = 53,172 - (0,155 * SM)	0,204	<0,001
silte (%)	silte = 20,039 + (0,0246 * SM)	0,019	0,087
argila (%)	argila = 26,780 + (0,131 * SM)	0,299	<0,001
matiz YR	matiz = 7,847 - (0,0133 * SM)	0,408	<0,001
Hm/(Hm+Gt) (%)	Hm/(Hm+Gt) = 9,430 + (0,205 * SM)	0,432	<0,001
Fe _d (g kg ⁻¹)	Fe _d = 10,780 + (0,259 * SM)	0,592	<0,001
P rem (mg L ⁻¹)	P rem = 42,355 - (0,0700 * SM)	0,174	<0,001

N=149. Hm: hematita; Gt: goethita; Fe_d: ferro referente aos óxidos de ferro pedogênicos; P rem: fósforo remanescente; SM: suscetibilidade magnética.

Nas classes de solo, o grupo um e dois foram os que melhor foram representados pela SM. O grupo um, em que estão incluídos os Latossolos e Nitossolos o atributo com o modelo maior de R² foi o Fe_d, ademais todos os atributos do grupo foram significantes com exceção do silte e P rem. No grupo dois, referente aos Argissolos e Plintossolos, os únicos atributos que não apresentaram relação linear significativa com a SM foram o silte e o matiz. No grupo três, referente aos Luvisolos, Chernossolos, Cambissolos, Vertissolos e Neossolos, os únicos atributos que expressaram significância foram o matiz, a razão Hm/(Hm+Gt) e o Fe_d. No grupo quatro, dos Gleissolos e Planossolos, nenhum dos atributos teve significância (Tabela 7). Tal resultado obtido no grupo

quatro já era esperado, uma vez que esses solos foram formados pelo processo pedogenético de gleização, onde a concentração dos óxidos de ferro é muito baixa ou inexistente (KÄMPF; CURI, 2000).

Tabela 7. Parâmetros da regressão linear dos atributos de solos separados por grupos de classes de solos com a suscetibilidade magnética.

atributo	equação	R ²	P	N
Grupo 1				
areia (%)	areia = 43,508 - (0,117 * SM)	0,296	<0,001	
silte (%)	silte = 17,230 + (0,0206 * SM)	0,060	0,157	
argila (%)	argila = 39,261 + (0,0961 * SM)	0,327	<0,001	
matiz YR	matiz = 6,693 - (0,00874 * SM)	0,404	<0,001	35
Hm/(Hm+Gt) (%)	Hm/(Hm+Gt) = 29,462 + (0,130 * SM)	0,220	0,004	
Fe _d (g kg ⁻¹)	Fe _d = 29,577 + (0,180 * SM)	0,363	<0,001	
P rem (mg L ⁻¹)	P rem = 32,886 - (0,0205 * SM)	0,042	0,237	
Grupo 2				
areia (%)	areia = 68,480 - (0,934 * SM)	0,330	<0,001	
silte (%)	silte = 13,608 + (0,310 * SM)	0,122	0,011	
argila (%)	argila = 17,595 + (0,627 * SM)	0,399	<0,001	
matiz YR	matiz = 7,706 - (0,0446 * SM)	0,199	0,012	57
Hm/(Hm+Gt) (%)	Hm/(Hm+Gt) = 5,831 + (0,643 * SM)	0,332	<0,001	
Fe _d (g kg ⁻¹)	Fe _d = 4,179 + (0,447 * SM)	0,610	<0,001	
P rem (mg L ⁻¹)	P rem = 48,508 - (0,464 * SM)	0,318	<0,001	
Grupo 3				
areia (%)	areia = 37,615 - (0,0274 * SM)	0,008	0,591	
silte (%)	silte = 28,871 + (0,0228 * SM)	0,014	0,469	
argila (%)	argila = 33,622 - (0,00447 * SM)	0,001	0,882	
matiz YR	matiz = 8,630 - (0,0126 * SM)	0,571	<0,001	40
Hm/(Hm+Gt) (%)	Hm/(Hm+Gt) = 3,921 + (0,151 * SM)	0,448	<0,001	
Fe _d (g kg ⁻¹)	Fe _d = 14,575 + (0,193 * SM)	0,504	<0,001	
P rem (mg L ⁻¹)	P rem = 37,059 - (0,0362 * SM)	0,046	0,186	
Grupo 4				
areia (%)	areia = 61,417 - (0,300 * SM)	0,001	0,890	
silte (%)	silte = 19,156 + (0,0813 * SM)	0,000	0,947	
argila (%)	argila = 20,158 + (0,311 * SM)	0,004	0,816	
matiz YR	matiz = 8,697 - (0,0110 * SM)	0,008	0,727	17
Hm/(Hm+Gt) (%)	Hm/(Hm+Gt) = 2,372 - (0,0128 * SM)	0,003	0,836	
Fe _d (g kg ⁻¹)	Fe _d = 3,624 + (0,124 * SM)	0,012	0,672	
P rem (mg L ⁻¹)	P rem = 51,345 - (0,122 * SM)	0,002	0,860	

Hm: hematita; Gt: goethita; Fe_d: ferro referente aos óxidos de ferro pedogênicos; P rem: fósforo remanescente; SM: suscetibilidade magnética.

Nos grupos de litologia o grupo que alcançou os valores de R² mais elevados com significância (p<0,001) foi o grupo um, este que contempla rochas ígneas extrusivas. Diversos estudos selecionam solos que possuem como material de origem rochas ígneas, pois nesses solos possuem uma maior

expressão dos óxidos de ferro, proporcionando uma maior relação com a SM (SIQUEIRA et al., 2010; RAMOS et al., 2017). Nos demais grupos, o Fe_d foi atributo que apresentou os parâmetros de regressão melhor avaliados (Tabela 8).

Tabela 8. Parâmetros da regressão linear dos atributos de solos separados por grupos de classes de litologia com a suscetibilidade magnética.

atributo	equação	R ²	P	N
Grupo 1				
areia (%)	areia = 41,232 - (0,102 * SM)	0,239	<0,001	
silte (%)	silte = 23,887 - (0,000745 * SM)	0,000	0,972	
argila (%)	argila = 34,881 + (0,103 * SM)	0,339	<0,001	
matiz YR	matiz = 7,499 - (0,0123 * SM)	0,547	<0,001	43
Hm/(Hm+Gt) (%)	Hm/(Hm+Gt) = 17,024 + (0,192 * SM)	0,414	<0,001	
Fe_d (g kg ⁻¹)	Fe_d = 24,988 + (0,200 * SM)	0,403	<0,001	
P rem (mg L ⁻¹)	P rem = 32,581 - (0,0176 * SM)	0,399	0,199	
Grupo 2				
areia (%)	areia = 38,496 - (0,0464 * SM)	0,016	0,460	
silte (%)	silte = 26,892 + (0,0237 * SM)	0,014	0,497	
argila (%)	argila = 34,723 + (0,0228 * SM)	0,009	0,581	
matiz YR	matiz = 8,285 - (0,00690 * SM)	0,193	0,007	36
Hm/(Hm+Gt) (%)	Hm/(Hm+Gt) = 5,953 + (0,0456 * SM)	0,220	0,004	
Fe_d (g kg ⁻¹)	Fe_d = 13,173 + (0,195 * SM)	0,638	<0,001	
P rem (mg L ⁻¹)	P rem = 36,973 - (0,0534 * SM)	0,059	0,153	
Grupo 3				
areia (%)	areia = 61,152 - (0,181 * SM)	0,088	0,112	
silte (%)	silte = 18,726 + (0,00514 * SM)	0,000	0,944	
argila (%)	argila = 19,386 + (0,196 * SM)	0,327	<0,001	
matiz YR	matiz = 7,724 - (0,0375 * SM)	0,441	<0,001	30
Hm/(Hm+Gt) (%)	Hm/(Hm+Gt) = 8,569 + (0,521 * SM)	0,395	<0,001	
Fe_d (g kg ⁻¹)	Fe_d = 5,327 + (0,257 * SM)	0,717	<0,001	
P rem (mg L ⁻¹)	P rem = 47,262 - (0,159 * SM)	0,255	0,004	
Grupo 4				
areia (%)	areia = 58,815 - (0,0361 * SM)	0,000	0,974	
silte (%)	silte = 17,968 + (0,226 * SM)	0,006	0,722	
argila (%)	argila = 23,165 + (0,215 * SM)	0,006	0,729	
matiz YR	matiz = 8,415 - (0,233 * SM)	0,498	<0,001	22
Hm/(Hm+Gt) (%)	Hm/(Hm+Gt) = 2,253 + (1,894 * SM)	0,473	<0,001	
Fe_d (g kg ⁻¹)	Fe_d = 3,227 + (0,768 * SM)	0,620	<0,001	
P rem (mg L ⁻¹)	P rem = 46,779 - (0,0473 * SM)	0,001	0,872	
Grupo 5				
areia (%)	areia = 78,274 - (2,440 * SM)	0,357	0,009	
silte (%)	silte = 8,540 + (0,521 * SM)	0,145	0,119	
argila (%)	argila = 13,911 + (1,877 * SM)	0,438	0,003	
matiz YR	matiz = 8,552 - (0,0417 * SM)	0,199	0,064	18
Hm/(Hm+Gt) (%)	Hm/(Hm+Gt) = 3,290 + (0,283 * SM)	0,260	0,031	
Fe_d (g kg ⁻¹)	Fe_d = 2,924 + (1,181 * SM)	0,757	<0,001	
P rem (mg L ⁻¹)	P rem = 54,587 - (1,084 * SM)	0,456	0,002	

Hm: hematita; Gt: goethita; Fe_d : ferro referente aos óxidos de ferro pedogênicos; P rem: fósforo remanescente; SM: suscetibilidade magnética.

No grupo um de litologia, os únicos atributos que não tiveram significância foram o silte e o P rem. No grupo dois, com solos formados de rochas como granito, gnaisse e riodacito, o único atributo que expressou significância foi o Fe_d . No grupo três, com os arenitos e conglomerados, os atributos que expressaram significância foram os teores de argila, razão $Hm/(Hm+Gt)$ e o Fe_d . No grupo quatro, com o argilito, siltito e folhelhos, os atributos com significância foram o matiz, a razão $Hm/(Hm+Gt)$ e o Fe_d e, já no grupo cinco, com os depósitos costeiros, somente os resultados do Fe_d foram significativos (Tabela 8).

Com os diferentes grupamentos de calibração, as equações obtidas foram utilizadas para aplicação em amostras de validação. Os parâmetros de acurácia na validação evidenciaram o Fe_d como atributo que a SM melhor estimou nos dados gerais. Nas classes de solo, o desempenho da razão $Hm/(Hm+Gt)$ foi o mais elevado no grupo um, no restante dos grupos o Fe_d foi o atributo melhor estimado. Nos grupos de litologia, os parâmetros melhor avaliados foram verificados com o matiz no grupo um, com o teor de argila no grupo dois, com o Fe_d nos grupos três e quatro e novamente com o matiz no grupo cinco (Tabela 9).

Tabela 9. Raiz do erro quadrático médio (RMSE) e coeficiente de correlação (R^2) estimados a partir da validação externa, com utilização dos atributos do solo selecionados.

atributos	dados		classes de solo								classes de litologia									
	gerais		grupo 1		grupo 2		grupo 3		grupo 4		grupo 1		grupo 2		grupo 3		grupo 4		grupo 5	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
parâmetros																				
areia	0.17	23.38	0.17	20.02	0.62	14.92	0.04	20.50	0.86	38.42	0.11	18.59	0.10	24.29	0.62	15.72	0.10	27.83	0.13	30.96
silte	0.01	13.80	0.12	8.86	0.10	9.14	0.15	14.83	0.01	15.06	0.00	15.18	0.01	14.39	0.19	9.51	0.02	17.40	0.26	9.10
argila	0.27	14.43	0.14	15.23	0.90	6.77	0.02	13.00	0.72	13.81	0.15	14.66	0.33	16.37	0.84	14.83	0.21	12.10	0.13	10.60
matiz YR	0.27	1.43	0.20	1.20	0.01	1.88	0.41	0.57	0.74	0.17	0.66	1.09	0.01	0.65	0.04	4.54	0.48	6.33	0.48	0.24
Hm/(Hm+Gt)	0.49	20.11	0.46	22.60	0.02	23.33	0.29	5.36	0.43	0.35	0.52	23.23	0.00	4.60	0.44	48.55	0.48	47.70	0.02	3.90
Fe _d	0.61	16.39	0.34	23.28	0.93	5.63	0.70	8.45	0.98	10.58	0.53	21.39	0.25	8.49	0.87	12.49	0.94	12.11	0.04	7.84
P rem	0.05	12.37	0.00	11.29	0.81	7.25	0.01	12.22	0.41	14.10	0.03	10.51	0.32	14.51	0.48	17.75	0.21	8.46	0.26	8.28

A SM apresentou amplitudes com os valores mínimos na região sul ($0,2 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) e máximos ao noroeste do Estado ($280 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) (Figura 10). O local em que a SM encontra-se mais elevada provavelmente está atrelada ao tipo de material de origem, que é predominantemente o basalto. Os valores mais elevados corroboram com os encontrados por Teixeira et al. (2018) em solos de basalto na serra geral com a SM média de $307 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ e por Preetz et al. (2008) em solos formados sob rochas básicas de 10 países.

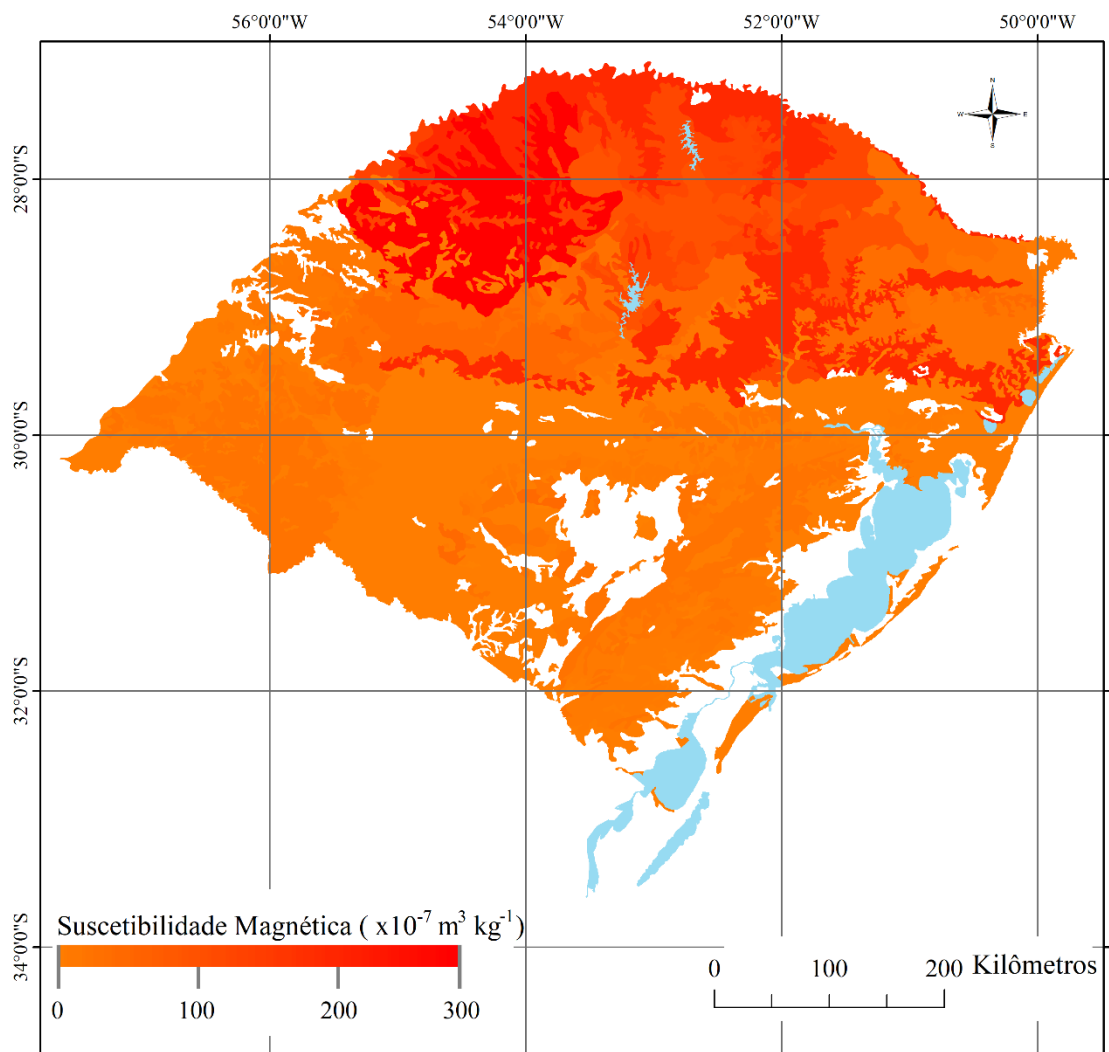


Figura 10. Suscetibilidade Magnética dos solos superficiais do Estado do Rio Grande do Sul.

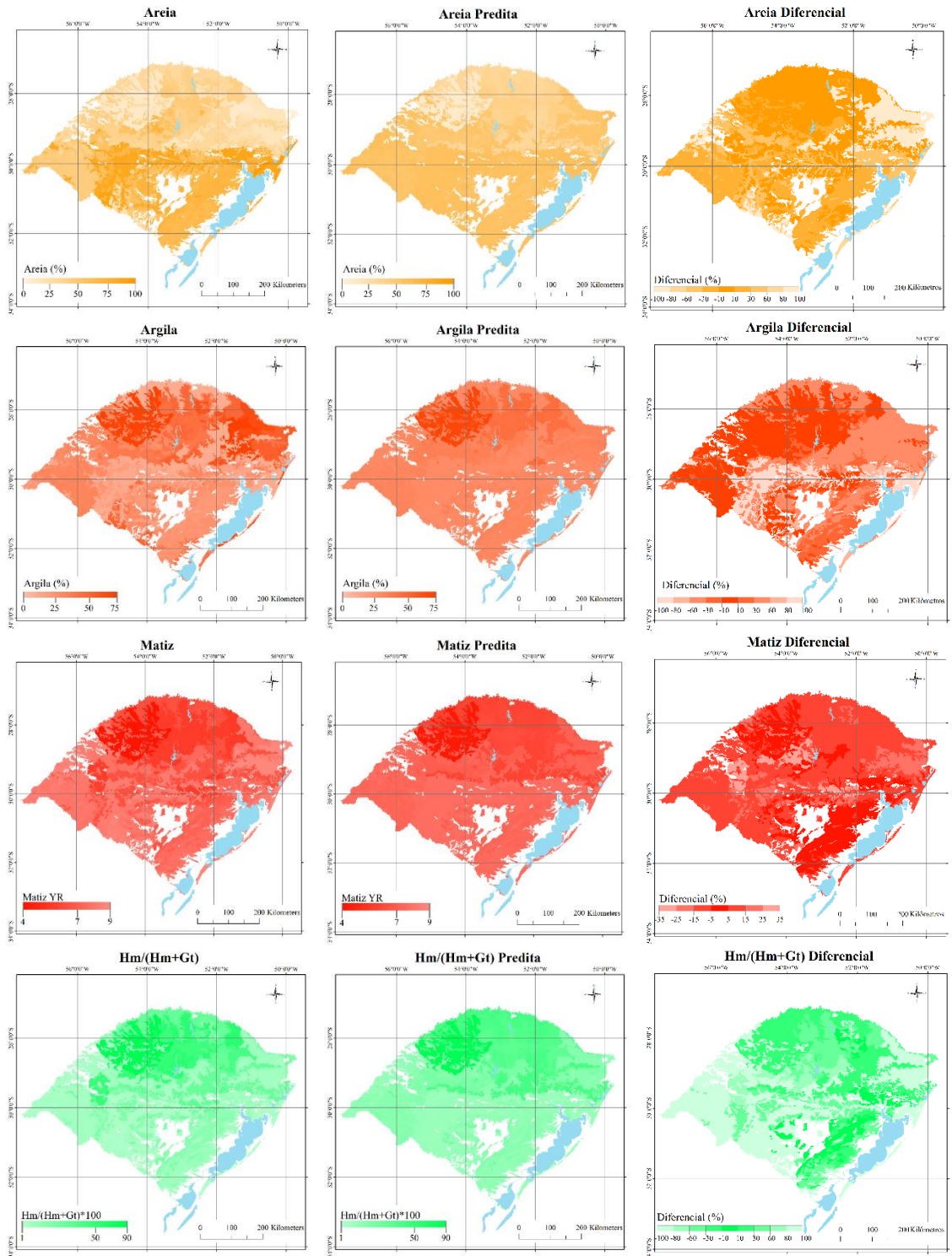
Os atributos nos quais os parâmetros expressaram significância nos dados gerais (Tabela 6) foram mapeados com seus teores reais e quantificados por meio da equação de regressão. Ademais a diferença percentual entre os

atributos mensurados e preditos discriminados em classes, também foi mapeada (Figura 11).

Os valores reais de areia tiveram um maior teor na região sul, atingindo teores de 88%, enquanto que ao noroeste 3%. Amplitudes semelhantes foram verificadas na areia predita com valores de 9 a 51%, com teores maiores e menores localizados nos mesmos locais da areia real. A argila variou de 9 a 67% e a argila predita de 28 a 63%, com os valores mais elevados na região norte, contrastando com os teores de areia (Figura 11). A maior SM ao norte do RS, com um maior teor de argila, revela a presença de minerais de expressão magnética nessa fração, como maghemita e ferrihidrita ferrimagnética (MICHEL et al., 2010; TORRENT et al., 2010). Fontes e Weed (1991), investigando doze Latossolos derivados de quatro materiais diferentes em Minas Gerais – Brasil, verificaram que a maghemita estava presente apenas em solos de rochas máficas e sugeriram sua formação por meio da oxidação da magnetita presente no material de origem.

O matiz foi semelhante nos dois mapas com valores reais variando entre 4 e 9,1 YR e valores estimados com 4,2 e 7,8 YR. Tonalidades mais avermelhadas (próximas de 4 YR) ficaram localizadas ao norte. A razão $Hm/Hm+Gt$ variou entre 1 e 86% e a razão predita de 10 a 72%. O Fe_d em valores reais variou de 0,9 a 86 g kg^{-1} , e o Fe_d predito entre 11,3 a 85 g kg^{-1} . Os mais altos valores de SM, argila, razão $Hm/Hm+Gt$ e Fe_d localizaram-se na região norte (Figura 11), onde o matiz foi mais avermelhada, confirmando assim o quanto a litologia, com predominância de basalto e andesito influencia na formação dos solos (Tabela 1, grupo de litologia 1) (FONTES; WEED, 1991; COSTA et al., 1999; POGGERE et al., 2018).

Quanto ao P rem, a amplitude em todo o RS foi entre 17 e 59 mg L^{-1} de P rem real e de 24 a 42 de P rem mg L^{-1} predito. O P rem foi mais elevado ao sul, isso significa que o fósforo adicionado na solução do solo foi mais absorvido em solos ao norte do que os solos do sul. Estudos indicam que a sorção do P está relacionada com o teor de argila, onde o conteúdo e cristalinidade dos óxidos de ferro atuam como os principais responsáveis (BARRÓN; TORRENT, 1996; BORTOLUZZI et al., 2015; FINK et al., 2016).



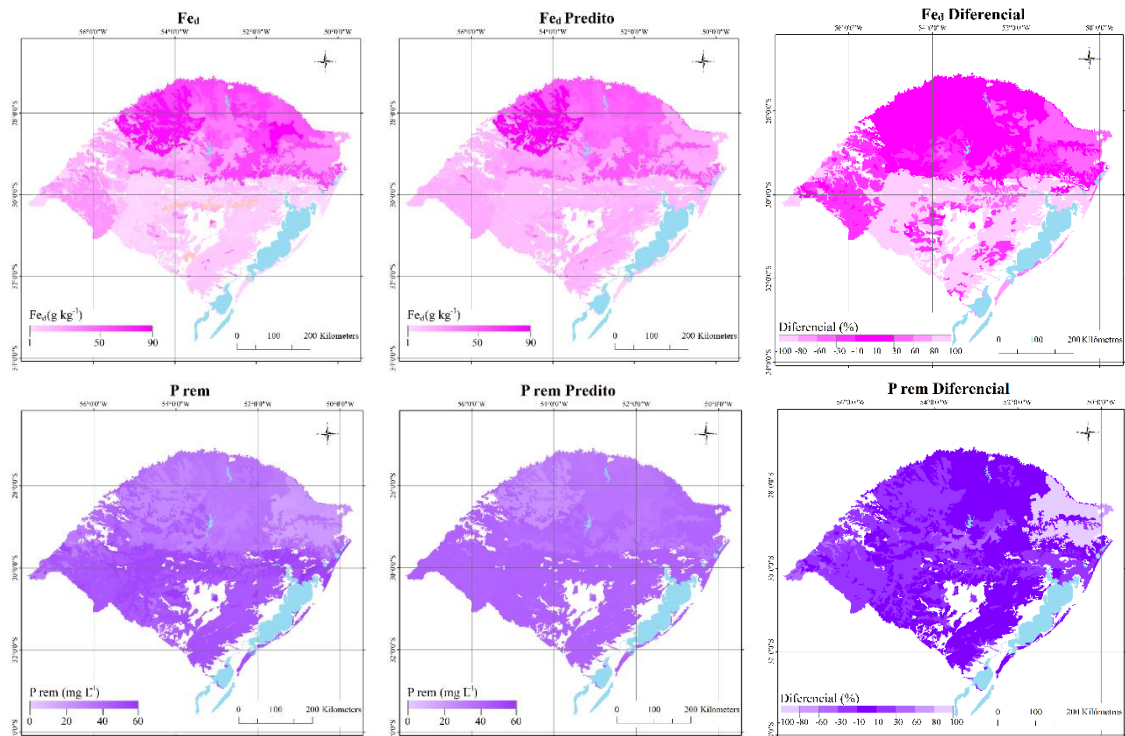


Figura 11. Na coluna da esquerda estão representados os atributos do solo e sua distribuição espacial com teores mensurados em laboratório, na coluna central são os mesmos atributos extraídos com a fórmula da regressão linear utilizando a suscetibilidade magnética na função de pedotransferência e na coluda da direita, classes de aplicabilidade da suscetibilidade magnética na predição dos atributos (Diferencial = $((\text{predito}-\text{mensurado})/\text{mensurado}) \cdot 100$). Hm: hematita; Gt: goethita; Fe_d: ferro referente aos óxidos de ferro pedogênicos; P rem: fósforo remanescente.

Nos mapas de diferença entre os atributos mensurados e preditos, as cores mais intensas representam os valores onde o atributo predito foi similar ao mensurado. Para isso assumimos um erro de 10% para mais ou para menos para os atributos areia, argila, Hm/(Hm+Gt), Fe_d e P rem e um erro de 5% para mais ou para menos para o matiz. Esses erros foram eleitos devido as amplitudes dos diferentes atributos. A areia predita foi similar a mensurada em 20% das amostras, a argila 22%, o matiz 20%, a razão Hm/(Hm+Gt) 9%, o Fe_d 13% e o P rem 39% (Figura 11). Para a maioria dos atributos, a similaridade foi verificada na região norte do RS, somente o atributo P rem evidenciou similaridade entre atributos mensurados e preditos em todo o território estadual.

4.5 Conclusões

A amplitude nos dados, aliada a um número expressivo de amostras, permite desenvolver um modelo robusto de predição. Para o conjunto que representa todos os solos do Rio Grande do Sul, a suscetibilidade magnética foi capaz de estimar os teores de areia, argila, o matiz, a razão hematita/(hematita+goethita), o ferro referente aos óxidos de ferro pedogênicos e o fósforo remanescente.

No grupamento por classes de solo, a suscetibilidade magnética melhor possibilita a predição nos grupos representados pelos Latossolos, Nitossolos, Argissolos e Plintossolos. No grupamento por litologia, o grupo com parâmetros mais adequados para a predição é o grupo representante das rochas ígneas extrusivas.

Além dos mapas confeccionados com a distribuição espacial da suscetibilidade magnética e atributos dos solos mensurados em solos do Rio Grande do Sul, a suscetibilidade magnética permite o mapeamento de atributos do solo preditos, como os teores de areia e argila, matiz, hematita/(hematita+goethita), ferro referente aos óxidos de ferro pedogênicos e fósforo remanescente.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. Á.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor de solo, formas do fósforo e adsorção de fosfatos em *Latosolos* desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 985-1002, 2003.
- AQUINO, R. E. *et al.* Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in Archeological Dark Earth in Apuí region, southern Amazonas. **Geoderma**, Amsterdam, v. 262, p. 35-44, 2016.
- ARIAS, O. V. *et al.* Homogenisation of a soil properties map by principal component analysis to define index agricultural insurance policies. **Geoderma**, Amsterdam, v. 311, p.149-158, 2018.
- ARROUAYS, D. *et al.* Soil legacy data rescue via GlobalSoilMap and other international and national initiatives, **GeoResJ**, Amsterdam, p. 1-54, 2017.
- ASGARI, N.; AYOUBI, S.; DEMATTÊ, J. A. M. Soil drainage assessment by magnetic susceptibility measures in western Iran. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 13, p. 35-42, 2018.
- AYOUBI, S.; ABAZARI, P.; ZERAATPISHEH, M. Soil great groups discrimination using magnetic susceptibility technique in a semi-arid region, central Iran. **Arabian Journal of Geosciences**, [S.l.], v. 11, p. 616, 2018.
- BAHIA, A. S. R. S.; MARQUES, J.; SIQUEIRA, D. S. Procedures using diffuse reflectance spectroscopy for estimating hematite and goethite in Oxisols of São Paulo, Brazil. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 5, p. 150-156, 2015.
- BAHIA, A. S. R. S. *et al.* Prediction and Mapping of Soil Attributes using Diffuse Reflectance Spectroscopy and Magnetic Susceptibility. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 81, n. 6, p. 1450-1462, 2017.
- BARRÓN, V.; MELLO, J. W. V.; TORRENT, J. Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de refletância difusa. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 139-162.
- BARRÓN, V.; TORRENT, J. Surface hydroxyl configuration of various crystal faces of hematite and goethite. **Journal of Colloid and Interface Science**, Orlando, v. 177, n. 2, p. 407-410, 1996.
- BEHERA, S. K. *et al.* Spatial variability of soil properties and delineation of soil management zones of oil palm plantations grown in a hot and humid tropical region of southern India. **Catena**, Cremlingen, v. 165, p. 251-259, 2018.
- BEN-DOR, E.; HELLER, D.; CHUDNOVSKY, A. A novel method of classifying soil profiles in the field using optical means. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, n. 4, p. 1113-1123, 2008.

BIGHAM, J. M.; FITZPATRICK, R. W.; SCHULZE, D. Iron oxides. *In*: DIXON, J. B.; SCHULZE, D. G. (ed.). **Soil mineralogy with environmental applications**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 323-366.

BONIS, A. *et al.* Different shades of red: the complexity of mineralogical and physico-chemical factors influencing the colour of ceramics. **Ceramics International**, Oxford, v. 43, n. 11, p. 8065–8074, 2017.

BORTOLUZZI, E. C. *et al.* Occurrence of iron and aluminum sesquioxides and their implications for the P sorption in subtropical soils. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 104, p. 196–204, 2015.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife: MAPA, 1973. 431 p. (Boletim técnico, 30).

BROWN, D. J. *et al.* Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 132, p. 273-290, 2006.

BUGGLE, B. *et al.* Iron mineralogical proxies and Quaternary climate change in SE-European loess–paleosol sequences. **Catena**, Cremlingen, v.117, p. 4-22, 2014.

CAMARGO, L. A. *et al.* Mapping of clay, iron oxide and adsorbed phosphate in Oxisols using diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 251-252, p. 124-132, 2015.

CAMARGO, L. A. *et al.* Predicting potentially toxic elements in tropical soils from iron oxides, magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectra. **Catena**, Cremlingen, v. 165, p. 503–515, 2018.

CANER, L. *et al.* Basalt and rhyo-dacite weathering and soil clay formation under subtropical climate in southern Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 235-236, p. 100-112, 2014.

CARVALHO FILHO, A. *et al.* Iron oxides in soils of different lithological origins in Ferriferous Quadrilateral (Minas Gerais, Brazil). **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 118, p. 1-7, 2015.

CHANG, C. W. *et al.* Near-Infrared Reflectance Spectroscopy-Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 2, p. 480-490, 2001.

CHEN, Y. *et al.* Linear Regression between CIE-Lab Color Parameters and Organic Matter in Soils of Tea Plantations. **Eurasian Soil Science**, Moscow, v. 51, n. 2, p. 199-203, 2018.

CIAMPALINI, A. *et al.* Improved estimation of soil clay content by the fusion of remote hyperspectral and proximal geophysical sensing. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, v. 116, p. 135-145, 2015.

- CLARK, R. N.; ROUSH, T. L. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. **Journal of Geophysical Research**, Hoboken, v. 89, n. 7, p. 6329-6340, 1984.
- COSTA, A. C. S. *et al.* Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. **Clays and Clay Minerals**, Oxford, v. 47, p. 466-473, 1999.
- BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS- CPRM. **Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro: CPRM, 2006. 1 mapa. Escala 1:750.000. Projeção Policônica. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/cartografia_regional/mapa_rio_grande_sul.pdf. Acesso em: 21 nov. 2016.
- CRUZ, N. N. L. *et al.* Color parameters applied to pedotransfer functions in the estimation of soil attributes. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 39, n. 4, p. 1477-1488, 2018.
- DANTAS, J. S. *et al.* Coeficiente de erodibilidade em sulcos e entressulcos de Argissolos coesos estimado pela cor do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 9, p. 700-707, 2014.
- DAVEY, B. G; RUSSELL, J. D.; WILSON, M. J. Iron oxide and clay minerals and their relation to colours of red and yellow podzolic soils near Sydney, Australia. **Geoderma**, Amsterdam, v. 14, 125-138, 1975.
- DAVIS, R. S. Using small, rareearth magnets to study the susceptibility of feebly magnetic metals. **American Journal Physics**, New York, v. 60, n. 4, p. 365-370, 1992.
- DEARING, J. A. *et al.* Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a national data set. **Geophysical Journal International**, Oxford, v. 127, n. 3, p. 728-734, 1996.
- DEARING, J. A. **Environmental magnetic susceptibility**: using the Bartington MS2 system. 2nd ed. Kenilworth: Chi Publishing, 1999. 54 p.
- DEMATTÊ, J. A. M. *et al.* Quantification of tropical soil attributes from ETM+/Landsat-7 data. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 28, n. 17, p. 3.813-3.829, 2007.
- DEMATTÊ, J. A. M. *et al.* Spectral regionalization of tropical soils in the estimation of soil attributes. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 47, n. 4, p. 589-598, 2016.
- DEMATTÊ, J. A. M.; GARCIA, G. J. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, n. 2, p. 327-342, 1999.
- DHAWALE, N. M. *et al.* Proximal soil sensing of soil texture and organic matter with a prototype portable mid-infrared spectrometer. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 66, p. 661-669, 2015.

DO CARMO, D. A. B. *et al.* Soil color for the identification of areas with different yield potential and coffee quality. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1261-1271, 2016.

FAN, Z. *et al.* Measurement of Soil Color: A Comparison between smartphone camera and the Munsell Color Charts. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 81, n. 5, p. 1139-1146, 2017.

FERNANDES, K. L. Estimativa da caulinita e gibbsita por técnicas de difração de raios x e espectroscopia de reflectância difusa dos solos do Planalto Ocidental Paulista. 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Ciência do Solo) - Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2017.

FERNANDES, K. L. *et al.* Magnetic and spectral signatures of Cerrado soils in the state of Goiás, Brazil. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, v. 52, n. 10, p. 923-932, 2017.

FINK, J. R. *et al.* Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, p. 62-68, 2016a.

FINK, J. R. *et al.* Phosphorus adsorption and desorption in undisturbed samples from subtropical soils under conventional tillage or no-tillage. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 179, n. 2, p. 198-205, 2016c.

FINK, J. R. *et al.* Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, p. 369-379, 2016b.

FONTES, M. P. F.; CARVALHO, I. A. Color attributes and mineralogical characteristics, evaluated by radiometry, of highly weathered tropical soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, n. 4, p. 1162-1172, 2005.

FONTES, M. P. F.; WEED, S. B. Iron oxides in selected Brazilian oxisols: I. mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, n. 4, p. 1143-1149, 1991.

FORRESTER, S. T. *et al.* Use of handheld midinfrared spectroscopy and partial least-squares regression for the prediction of the phosphorus buffering index in Australian soils. **Soil Research**, Toronto, v. 53, n. 1, p. 67-80, 2015.

GRUNWALD S.; VASQUES, G. M.; RIVERO, R. G. Fusion of soil and remote sensing data to model soil properties. *In*: SPARKS, D. L. (ed.). **Advances in Agronomy**. Amsterdam: Academic Press, 2015. p. 1-109. (Advances in Agronomy, v 129).

HUTENGS, C. *et al.* Comparison of portable and bench-top spectrometers for mid-infrared diffuse reflectance measurements of soils. **Sensors**, Basel, v. 18, p. 1-17, 2018.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Agricultura, pecuária e outros**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria>. Acesso em: 10 set. 2018.

IZQUIERDO-LLAVALL, E. *et al.* Rotational kinematics of basement antiformal stacks: paleomagnetic study of the Western Nogueras zone (Central Pyrenees). **Tectonics**, [S.l.], v. 37, n. 10, p. 3456-3478. 2018.

JI, W. *et al.* Assessment of soil properties in situ using a prototype portable MIR spectrometer in two agricultural fields. **Biosystems Engineering**, London, v. 152, p. 14-27, 2016.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. *In*: NOVAIS, R. N.; ÁLVAREZ V., V. H.; SCHAEFER. C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 107-138.

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Goethite and hematite in a climosequence in southern Brazil and their application in classification of kaolinitic soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 29, p. 27-39, 1983.

KLAMT, E.; DALMOLIN, R. S. D.; CABRAL, D. R. **Solos do município de São João do Polêsine**: características, classificação, distribuição geográfica e aptidão de uso. Santa Maria: [UFSM], 1997. 93 p.

LEMOS FILHO, L. C. A.; FERREIRA, L. L. N.; LYRA, D. L. Spatial variability of soil attributes as indicators of environmental deterioration in watersheds. **Revista Agro@mbiente On-line**, Monte Cristo, v. 11, n. 1, p. 11-20, 2017.

LIU, L. *et al.* Magnetic susceptibility characteristics of surface soils in the Xilingele grassland and their implication for soil redistribution in wind-dominated landscapes: A preliminary study. **Catena**, Cremlingen, v. 163, p. 33-41, 2018.

LIZAGA, I. *et al.* Linking land use changes to variation in soil properties in a Mediterranean mountain agroecosystem. **Catena**, Cremlingen, v.172, p. 516-527, 2019.

MA, F. *et al.* Soil variability description using Fourier transform mid-infrared photoacoustic spectroscopy coupling with RGB method. **Catena**, Cremlingen, v. 152, p. 190-197, 2017.

MALUF, J. R. T. Nova classificação climática do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 141-150, 2000.

MARTÍNEZ-CARRERAS, N. *et al.* Assessment of different colour parameters for discriminating potential suspended sediment sources and provenance: a multi-scale study in Luxembourg. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 118, p. 118–129, 2010.

MAZURANA, M. *et al.* Soil susceptibility to compaction under use conditions in southern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 41, n. 1, p. 60-71, 2017.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soil and clays by dithionite–citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, Oxford, v. 5, p. 317-27, 1960.

MICHEL, F. M. *et al.* Ordered ferrimagnetic form of ferrihydrite reveals links between structure, composition and magnetism. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Stanford, v. 107, n. 7, p. 2787-2792, 2010.

MILOSEVIC, M.; BERETS, S. L. A review of FT-IR diffuse reflection sampling considerations. **Applied Spectroscopy Reviews**, New York, v. 37, n. 4, p. 347-364, 2002.

MOUAZEN, A. M. *et al.* Potential of visible and near-infrared spectroscopy to derive colour groups utilising the Munsell soil colour charts. **Biosystems Engineering**, London, v. 97, p. 131-143, 2007.

MUNSELL soil color charts. Revised Washable Edition. New Windsor: Macbeth, 2000. 10 p.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *In*: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. **Methods of soil analysis: chemical and microbiological properties**. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1982. p. 539-579.

OWLIAIE, H. R.; NAJAFI GHIRI M. The Magnetic Susceptibility and Iron Oxides of Aquic Soils in Southern Iran. **Eurasian Soil Science**, Moscow, v. 51, n. 10, p. 1252-1265, 2018

PINGGUO, Y.; BYRNE, J. M.; YANG, M. Spatial variability of soil magnetic susceptibility, organic carbon and total nitrogen from farmland in northern China. **Catena**, Cremlingen, v. 145, p. 92-98, 2016.

POGGERE, G. C. *et al.* Maghemite quantification and magnetic signature of Brazilian soils with contrasting parent materials. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 161, p. 385–394, 2018.

PREETZ, H.; ALTFELDER, S.; IGEL, J. Tropical soils and landmine detection: an approach for a classification system. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 72, n. 1, p. 151-159, 2008.

PRETORIUS, M. L.; VAN HUYSSTEEN, C. W.; BROWN, L. R. Soil color indicates carbon and wetlands: developing a color-proxy for soil organic carbon and wetland boundaries on sandy coastal plains in South Africa. **Environmental monitoring and assessment**, Dordrecht, v. 189, n. 11, p. 1-18, 2017.

RAMOS, P. V. *et al.* Magnetic susceptibility of soil to differentiate soil environments in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 2017, v. 41, p. 1-13, 2017.

- REICHERT, J. M. *et al.* Compressibility and elasticity of subtropical no-till soils varying in granulometry organic matter, bulk density and moisture. **Catena**, Cremlingen, v. 165, p. 345-357, 2018.
- RESENDE, M.; SANTANA, D. P.; REZENDE, S. B. Susceptibilidade magnética em latossolo do Sudeste e Sul do Brasil. *In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA*, 3., 1988, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Embrapa-SNLCS/SBCS, 1988. p. 233-258.
- ROCKSTRÖM, J. A. *et al.* Safe operating space for humanity. **Nature**, London, v. 461, p. 472-475, 2009.
- ROGERI, D. A. *et al.* Remaining phosphorus content to determine phosphorus availability of the soils in Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 52, n. 12, p. 1203-1214, 2017.
- ROSEMARY, F. *et al.* Exploring the spatial variability of soil properties in an Alfisol soil catena. **Catena**, Cremlingen, v. 150, p. 53-61, 2017.
- SÁNCHEZ-MARAÑÓN, M.; ROMERO-FREIRE, A.; MARTÍN-PEINADO, F. J. Soil-color changes by sulfuricization induced from a pyritic surface sediment. **Catena**, Cremlingen, v. 135, p. 173-183, 2015.
- SANTOS, H. G. *et al.* **O novo mapa de solos do Brasil**: legenda atualizada. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/920267>. Acesso em: 12 fev. 2019.
- SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: MATTOS, J. S. R. 2018. 590 p.
- SCHEINOST, A. C. *et al.* Use and limitations of second-derivative diffuse reflectance spectroscopy in the visible to near-infrared range to identify and quantify Fe oxide minerals in soils. **Clays and Clay Minerals**, Oxford, v. 46, n. 5, p. 528-536, 1998.
- SCHWANNINGER, M. *et al.* A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Gold Coast, v. 19, n. 5, p. 287-308, 2011.
- SCHWERTMANN U. Relations between iron oxides, soil color, and soil formation. *In: BIGHAM J. M.; CIOLKOSZ, E. J. Soil color*. Madison: Soil Science Society of America, 1993. p. 51-69.
- SCHWERTMANN U.; TAYLOR, R. M. Iron oxides. *In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. Minerals in Soil Environments*. Madison: Soil Science Society of America, 1977. p. 145-180.
- SELLITTO, V. M. *et al.* Application of diffuse reflectance spectroscopy (DRS) to study European volcanic soils: a preliminary examination. **Soils of Volcanic Regions in Europe**, Berlin, p. 437-452, 2007.

SHIELDS, J. A. *et al.* Measurement of soil color. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 46, n. 1, p. 83-90, 1966.

SILVA, A. R.; SOUZA JUNIOR, I. G. S.; COSTA, A. C. S. Suscetibilidade Magnética do horizonte B de solos do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 329-337, 2010.

SIQUEIRA, D. S. *et al.* Magnetic susceptibility for characterizing areas with diferente potentials for sugarcane production. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1349-1358, 2016.

SIQUEIRA, D. S. Mapeamento de atributos e planejamento amostral para Latossolos utilizando suscetibilidade magnética, cor e relação solo-paisagem. 2013. 113 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Produção Vegetal) - Programa de Pós-graduação em Agronomia, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2013.

SORIANO-DISLA, J. M. *et al.* Evaluation of the performance of portable visible-infrared instruments for the prediction of soil properties. **Biosystems engineering**, London, v. 161, p. 24-36, 2017.

SPINOLA, D. N. *et al.* Diagenetic reddening of early Eocene Paleosols on King George Island, Antarctica. **Geoderma**, Amsterdam, v. 315, p. 149-159, 2018.

STRECK, E. V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: Emater/RS-ASCAR, 2008. 222 p.

TANG, P. *et al.* Multi-frequency Electromagnetic Induction Survey for Archaeological Prospection: Approach and Results in Han Hangu Pass and Xishan Yang in China. **Surveys in Geophysics**. Dordrecht, v. 39, n. 6, p. 1285–1302, 2018.

TEIXEIRA, D. D. B. *et al.* Mapping units based on spatial uncertainty of magnetic susceptibility and clay content. **Catena**, Cremlingen, v. 164, p. 79-87, 2018.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. Brasília: Embrapa Solos, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>. Acesso em: 03 jan. 2018.

TORNQUIST, C. G. *et al.* Soil organic carbon stocks of Rio Grande do Sul, Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, p. 975-982, 2009.

TORRENT, J.; LIU, Q. S.; BARRÓN, V. Magnetic minerals in Calcic Luvisols (Chromic) developed in a warm Mediterranean region of Spain: origin and paleoenvironmental significance. **Geoderma**, Amsterdam, v. 154, p. 465-472, 2010.

- TORRENT, J. *et al.* Quantitative relationships between soil color and hematite content. **Soil Science**, Baltimore, v. 136, n. 6, p. 354-358, 1983.
- TORRENT, J., BARRON, V. Laboratory measurement of soil color: Theory and practice. *In*: BIGHAM J. M.; CIOLKOSZ, E. J. **Soil color**. Madison: Soil Science Society of America, 1993. p. 21-33.
- TORRENT, J.; BARRÓN, V. The visible diffuse reflectance spectrum in relation to the color and crystal properties of hematite. **Clays and Clay Minerals**, Oxford, v. 51, n. 3, p. 309-317, 2003.
- TORRENT, J.; BARRÓN, V. Diffuse reflectance spectroscopy. *In*: ULERY A. L.; DREES, L. R. **Methods of soil analysis**: Part 5: Mineralogical Methods. Madison: Soil Science Society of América, 2008. p. 367-385.
- TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U.; SCHULZE, D. G. Iron oxide mineralogy of some soils of two river terrace sequences in Spain. **Geoderma**, Amsterdam, v. 23, p. 191-208, 1980.
- USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. SOIL SURVEY STAFF. **Key to Soil Taxonomy**. Washington: Department of Agriculture/Natural Resources Conservations Service, 2014. 871 p.
- VAN AKEN, H. **Munsell Conversion Software 2019**. Disponível em: <http://wallkillcolor.com/Munsell19/CMC%20Instruments.htm>. Acesso em: 03 jan. 2018.
- VAN TOL, J. J. *et al.* Pedotransfer functions to predict Atterberg limits for South African soils using measured and morphological properties. **Soil Use and Management**, Bedfordshire, v. 32, p. 635-643, 2016.
- VARDI, M.; NINI, A. Near-infrared spectroscopy for evaluation of peripheral vascular disease. A systematic review of literature. **European Journal of Vascular and Endovascular Surgery**, London, v. 35, n. 1, p. 68-74, 2008.
- VISCARRA ROSSEL, R. A. *et al.* Colour space models for soil Science. **Geoderma**, Amsterdam, v. 133, p. 320-337, 2006.
- VISCARRA ROSSEL, R. A. ParLeS: software for chemometric analysis of spectroscopic data. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, Amsterdam, v. 90, n. 1, p. 72-83, 2008.
- VISCARRA ROSSEL, R. A. *et al.* In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by vis–NIR spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 150, p. 253-266, 2009.
- VISCARRA ROSSEL, R. A. *et al.* Mapping iron oxides and the color of Australian soil using visible–near-infrared reflectance spectra. **Journal Of Geophysical Research**, Hoboken, v. 115, p. 1-13, 2010.
- VODYANITSKII, Y. N. *et al.* Iron compounds and the color of soils in the Sakhalin Island. **Eurasian Soil Science**, Moscow, v. 51, n. 2, p. 163-175, 2018.

WYSZECKI, G.; STILES, W. **Color Science**: concepts and methods, quantitative data and formulae. 6th ed. New York. 1982. 976 p.

XU, D. *et al.* Assessment of important soil properties related to Chinese Soil Taxonomy based on vis–NIR reflectance spectroscopy. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, New York, v. 144, p. 1-8, 2018.

YAO, R. J. *et al.* Determination of site-specific management zones using soil physico-chemical properties and crop yields in coastal reclaimed farmland. **Geoderma**, Amsterdam, v. 232-234, p. 381-393, 2014.

RESUMO BIOGRÁFICO

Priscila Vogelei Ramos nasceu em 07 de junho de 1989, na cidade de Rosário do Sul e ainda quando criança mudou-se para Itaqui - RS. Filha de José da Silva Ramos e Carla Mey Vogelei Ramos, irmã mais velha de Paola e José Carlos Vogelei Ramos. Desde 2012 é companheira de Cleiton Lixieski Sell. Graduou-se em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal do Pampa, Campus de Itaqui, desenvolvendo atividades de Iniciação Científica na área de Física do Solo, obtendo o título em dezembro de 2012. Na Universidade Federal de Santa Maria concluiu em fevereiro de 2015 o curso de Mestrado em Ciência do Solo, atuando no grupo de pesquisa em Pedologia, sob orientação do professor Dr. Ricardo Dalmolin. Em julho de 2015 graduou-se no Programa Especial de Graduação de Formação de Professores para a Educação Profissional pela Universidade Federal de Santa Maria. Em março de 2015 iniciou o curso de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul sob a orientação do Professor Dr. Alberto Vasconcellos Inda, com período de doutorado sanduíche (2017) na Universidad de Córdoba – Espanha, com a supervisão do Professor Dr. Vidal Barrón.