



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB

Programa de Pós-Graduação em Geografia

Linha 1: Estudo dos Sistemas Naturais

Dissertação de Mestrado

**Mapeamento de solos através de técnicas diretas e indiretas na Apa
Nascentes Do Rio Vermelho, Mambáí-GO.**

JOSÉ GUSTAVO DA SILVA NUNES.

Brasília,

Março de 2020.



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB

Programa de Pós-Graduação em Geografia – PÓS-GEA

Dissertação de Mestrado

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA – PÓS-GEA

LINHA1: ANÁLISE DE SISTEMAS NATURAIS

**Mapeamento de solos através de técnicas diretas e indiretas na Apa
Nascentes Do Rio Vermelho, Mambaí-GO.**

José Gustavo da Silva Nunes.

Trabalho de conclusão de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Campus Darcy Ribeiro, Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre em Geografia.

Orientador: Rogério Elias Soares Uagoda.

Brasília,

Março de 2020.



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB

Programa de Pós-Graduação em Geografia – PÓS-GEA

Dissertação de Mestrado

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA – PÓS-GEA
LINHA1: ANÁLISE DE SISTEMAS NATURAIS.

MAPEAMENTO DE SOLOS ATRAVÉS DE TÉCNICAS DIRETAS E
INDIRETAS NA APA NASCENTES DO RIO VERMELHO, MAMBAÍ-GO.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Campus Darcy Ribeiro, Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre em Geografia.

Banca examinadora:

Brasília, 20 de Março de 2020.

Prof. Dr. Rogério Elias Soares Uagoda, GEA/UnB
Orientador

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges,
IGD/UNB

Prof. Dr. Uidemar Morais Barral,
IGD/UNB

Dedico este trabalho primeiramente à Deus que me conduziu em cada conquista, tem me dado proteção, um lar e uma família maravilhosa.

Dedico também à minha família de origem, em especial minha mãe, Maria de Lourdes, que sempre me apoiou em todos os anos de estudos, nos momentos bons e ruins, ajudando-me a superar as crises externa e internas, que fez muito bem o papel de pai e não deixou eu me perder por caminhos tortuosos, durante a longa caminhada da vida.

Dedico à minha família que começou a se formar, ao meu filho Davi, à minha filha Maria Luíza, e a Nynna Alves (minha futura esposa), porque tem me dado mais motivos para vencer.

Dedico ainda a toda equipe de Professores da Geografia UnB, que me forneceu suporte, conhecimento e muitos ensinamentos para além de conteúdos acadêmicos, que vou levar como experiência por toda a vida. E a todos que contribuíram para a minha formação intelectual e pessoal.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus por tudo que tem me dado e pelos caminhos que tem traçado em minha vida, pois sem ele não estaria concluindo mais esta etapa.

E agradeço a toda equipe de pós-graduação em Geografia UnB, faxineiras, copeiras, secretários, professores e quem mais contribuiu para tornar este curso de mestrado acolhedor e inclusivo para quem desejar nele entrar. Em especial ao professor orientador deste trabalho, Rogério Uagoda, que me ajudou a superar mais esta etapa acadêmica, com muita dedicação e paciência, dispondo de muito do seu tempo para a realização deste trabalho acadêmico, como também ao ICMBio/CECAV que tem dado apoio financeiro e estrutural à pesquisa.

E por último, mas não menos importante, agradeço aos professores de educação básica que ajudaram a formar meu caráter e me forneceram uma base para entrar na universidade.

NUNES, JOSÉ GUSTAVO DA SILVA.

Mapeamento de solos através de técnicas diretas e indiretas na Apa Nascentes Do Rio Vermelho, Mambaí - Goiás. – Estudo de caso.

(UNB/PÓS-GEA – José Gustavo da Silva Nunes, Brasília/DF. 2019)

Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de Brasília.

Curso de Mestrado em Geografia.

Orientador: Rogério Uagoda.

1 Mapeamento. 2 Solos. 3 Carste. 4 Técnicas Diretas e indiretas.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

José Gustavo da Silva Nunes

Sumário

Resumo	11
CAPÍTULO 1 (APRESENTAÇÃO DA PESQUISA).....	12
Área de Estudo.....	13
CAPÍTULO 2 (ARCABOUÇO TEÓRICO/METODOLÓGICO).....	17
Solos Em Carste Tropical, Desenvolvimento Pedogenético E Comportamento Hidrológico: Uma Revisão Teórica.....	17
Introdução	18
Propriedades Físicas e Químicas da Água.....	20
Grupos Hidrológicos de Solos.....	21
Solos em áreas Cársticas	25
Solos Tropicais em áreas cársticas brasileiras	27
Considerações Finais.....	31
Referências.....	32
Análise da eficiência dos métodos indiretos para o mapeamento de solos frente às técnicas diretas, e suas possíveis associações: Uma revisão metodológica	36
Introdução	37
Mapeamento digital de solos.....	38
Georadar.....	40
Espectrorradiometria.....	44
Comportamento Espectral do Solo	47
Radiometria	49
Integração entre GPR e SAR.....	50
Conclusão.....	52
Referências	52
CAPÍTULO 3 (ARTIGOS DE RESULTADOS)	60
O uso do Georadar para estudo da Catena em ambiente cárstico da APA Nascentes do Rio Vermelho, Mambaí-Go.	60
Resumo.....	60
Introdução	61
Materiais e Métodos.....	64
Área de Estudo	65
Resultados e Discussões.....	71
Considerações Finais.....	82
Referências.....	83
Mapeamento de solos em área cárstica, através do estudo da catena com auxílio de geotecnologias e descrições em campo: Um estudo de caso na APA Nascentes do Rio vermelho, Mambaí – GO.....	86

Introdução	87
Materiais e Métodos	89
Área de Estudo	89
Resultados e Discussões.....	97
Considerações Finais.....	107
Referencias.....	108

Figura 1. Mapa de localização, geologia e pedologia utilizados como base para APA NRV.	14
Figura 2. Principais Horizontes diagnósticos superficiais. Fonte: FOTH & SCHAFER, 1980. Adaptado pelo autor para o SIBCS.	18
Figura 3. Horizontes diagnósticos subsuperficiais. Fonte: FOTH & SCHAFER, 1980. Adaptado pelo autor para o SIBCS.	19
Figura 4. Organograma das propriedades e interações básicas entre água e solo, abordando de forma sequencial e esquemática as propriedades físicas e, como elas interagem para que ocorra a retenção da água pelo solo.	20
Figura 5. Mapa mostrando áreas cársticas em todo o planeta. Fonte: Produzido pelo autor com base nos dados da Universidade de Auckland.	21
Figura 6. Condições e propriedades do solo para classificação dos Grupos Hidrológicos.	23
Figura 7. Representação esquemática de como solos podem estar dispostos em áreas cársticas. Fonte: Piló e Auler, 2013.	26
Figura 8. Mapa de pesquisas de solos em áreas cársticas, com a localização das rochas Calcíticas e Dolomíticas. Fonte: Produzido pelo autor com a base de dados do CPRM (1997). ..	28
Figura 9. Conjunto de informações para o mapeamento digital de solos. Fonte: Caten et al., 2012.	38
Figura 10. Cronogramas mostrando a disponibilidade pública do software de geomorfometria. Fonte Wood, 2009.....	39
Figura 11. Aplicação do método GPR.	40
Figura 12. Variação da permissividade relativa com o aumento do teor de água em um solo com alto teor de caulinita. Fonte: Thomas et al. (2006).....	42
Figura 13. Esquema ilustrando a espectrorradiometria. Fonte: Meneses, 2001.	44
Figura 14. Localizações dos 12.509 pontos de resposta espectral que estão no banco de dados global. Fonte: Viscarra Rossel, 2016.	45
Figura 15. Locais de amostragem da Biblioteca Espectral do Solo do Brasil. Fonte: Demattê et al, 2019.....	46
Figura 16. Determinação de ângulos, avaliações de concavidade, banda e dados simulados de curvas espectrais dos solos estudados por Demattê, comparados com as curvas espectrais dos tipos de solo classificados por Stoner & Baumgardner (1981) e Formaggio et al. (1996). Fonte: Demattê, 2002.	48
Figura 17. Esquema de aquisição de dados através de antenas do tipo SAR. Fonte: Agência de Exploração Aeroespacial do Japão, 2014.	50
Figura 18. As curvas superior e inferior referem-se, respectivamente, às potências GPR e SAR. Fonte: Grandjean et al., 2003.....	51
Figura 19. Aplicação do método GPR.	62
Figura 20. Variação da permissividade relativa com o aumento do teor de água em um solo com alto teor de caulinita. Fonte: Thomas et al. (2006).....	64
Figura 21. Mapa de localização da APA NRV.	65
Figura 22. Mapa geológico elaborado com a base de dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), e pedológico elaborado a partir da base de dados do SIEG-GO da APA NRV.	66

Figura 23. Seção de GPR executado na região da Caverna da Tarimba, apresentado no radargrama sem processamento.	68
Figura 24. Seção de GPR executado na região da Caverna da Tarimba, com todas as etapas de processamento sem o envelope, e sem aplicação do relevo.	68
Figura 25. Seção de GPR executado na região da Caverna da Tarimba, com todas as etapas de processamento executadas, sem aplicação do relevo.	68
Figura 26. Imagem da compartimentação da APA NRV, e perfis de GPR.	70
Figura 27. Modelo Geomorfológico da APA NRV, apresentando as litologias presentes na região, que exercem forte controle sobre as formações pedológicas.	72
Figura 28. Localização do perfil de GPR 05, executado próximo à Caverna da Tarimba.	73
Figura 29. Resultados da seção de GPR 05, executado na região da Caverna da Tarimba, com a topografia aplicada ao perfil, e as fotografias do solo.	74
Figura 30. Resultados da seção de GPR 07, executado na região da Caverna Extrema, com a topografia aplicada ao perfil, e as fotografias do solo.	76
Figura 31. Seção de GPR 04, demonstrando a situação de contato entre arenitos da Formação Posse e Serra das Araras.	77
Figura 32. Seção de GPR 15, realizado na área da Calmasa Calcário Mambaí S/a, próximo a drenagem.	78
Figura 33. Seção de GPR 16, realizado na área da Calmasa Calcário Mambaí S/a.	79
Figura 34. Seção de GPR 17, realizado em uma área de chapada, demonstrando a relativa homogeneidade de latossolos, que são profundos, expressa em uniformidade.	80
Figura 35. Seção de GPR 21, realizado na área de um paleocanal, próximo a Cachoeira do Funil.	81
Figura 36. Esquema ilustrando a espectrorradiometria. Fonte: Meneses, 2001.	88
Figura 37. Mapa de localização da APA NRV.	90
Figura 38. Mapa geológico elaborado com a base de dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), e pedológico elaborado a partir da base de dados do SIEG-GO da APA NRV.	91
Figura 39. Imagem da compartimentação da APA NRV, seguido da localização dos pontos de coletas e descrições morfológicas.	93
Figura 40. Modelos de Elevação digital de Terreno testados para a elaboração da árvore de decisão e classificação automática do solo.	94
Figura 41. Ilustração da árvore de decisão com algumas das equações elaboradas para a classificação do Neossolo Litólico, Chernossolo e Latossolo.	96
Figura 42. Fluxograma das etapas de elaboração da pesquisa.	97
Figura 43. A) Perfil de Cambissolo desenvolvido em rochas da Formação Serra das Araras, devido ao relevo íngreme. B) Perfil de Chernossolo desenvolvido em carbonatos da Formação Lagoa do Jacaré, descrito em um perfil cavado pela erosão. C) Perfil de Latossolo desenvolvido em área de chapada da Formação Serra das Araras. D) Perfil de Neossolo Quartzarênico desenvolvido em rochas da Formação Posse. E) Perfil de Neossolo Litólico, desenvolvido em Siltitos da Formação Lagoa do Jacaré. F) Perfil de Organossolo, desenvolvido em Fundo de vale, sobre rochas da Formação Posse.	98
Figura 44. Formações geológica na Apa NRV. A) Formação Serra das Araras; B) Formação Posse; C) Contato entre os Grupos Urucuia e Areado; D) Grupo Areado; E) Pelito da Formação Lagoa do Jacaré; F) Transição entre pelitos e carbonatos impuros da Lagoa do Jacaré; G) Pacote de intercalações entre rochas da Formação Lagoa do Jacaré.	99
Figura 45. Sequência estratigráfica das litologias encontradas na Apa NRV associadas aos solos subjacentes.	100
Figura 46. A) Antigo nível dinâmico do lençol freático, registrado pelo nível laterítico. B) ilustração do paleocanal. C) Imagem de detalhe do nível laterítico. D) imagem de detalhe do paleocanal.	103

Figura 47. Situação do paleocanal e lençol freático, contribuindo para a gênese de lateritas que dão suporte aos relevos residuais da região.	103
Figura 48. Curvas espectrais com a remoção do contínuo, dos solos da área incluindo Cambissolos, Chernossolos, Neossolos, Latossolos e Organossolos, com a definição dos picos de reflexão para óxidos de ferro, água e alguns silicatos, É possível identificar que os argissolos tem maior quantidade de óxidos, capacidade de absorver água e quantidade de outros minerais silicatos, já os Neossolos apresentam as três características reduzidas.	104
Figura 49. Mapa de solo elaborado a partir das informações de campo e laboratório, introduzidas nas equações pedológicas.	105

Resumo

Esta pesquisa tem por objetivo elaborar um mapa de solos da Apa Nascentes do Rio Vermelho (NRV), com a obtenção de informações diretas de estudos, que envolve coleta de amostras, descrição morfológica de perfis, análises laboratoriais das amostras como geoquímica, fertilidade, granulometria, espectrorradiometria, para apoiar e validar os métodos indiretos de aquisição de dados que envolve o georadar, geoprocessamento e SIG. A Apa NRV está localizada no município de Mambaí Go, na porção nordeste do estado. Apresenta uma de área mais 176 mil hectares, e está compreendida na Bacia Hidrográfica do Tocantins. Na primeira etapa da pesquisa foi feito um levantamento bibliográfico, através do qual elaborou-se dois artigos científicos, um de revisão da teoria e outro de revisão da metodologia. Para a execução desta etapa optou-se pela busca de artigos indexados com mínimo Qualis A2. Na segunda etapa da pesquisa, após a obtenção dos dados de campo e laboratório, foi elaborado o artigo de resultados, através do qual explanou-se sobre os resultados das coletas superficiais, da análise da paisagem, das descrições morfológicas, da espectrorradiometria e do georadar. Através de ferramentas disponibilizadas no Envi 5.3, foi possível elaborar uma imagem de composição colorida composta pela elevação, declividade e aspecto, e classificar os solos com base em árvores de decisão, criando-se uma equação para cada solo descrito. O mapa pedológico apresentou resultado satisfatório, de forma que todos os pontos de controle foram coincidentes com a classificação apresentada.

Palavras chave: Mapeamento Pedológico; Métodos Diretos e Indiretos; Carste.

Abstract

This research has for objective to elaborate a soil map of Apa Nascentes do Rio Vermelho (NRV), obtaining direct information from studies, which involves sample collection, morphological description of profiles, laboratory analysis of samples such as geochemistry, fertility, granulometry, spectroradiometry, to support and validate the indirect methods that data acquisition involves georadar, geoprocessing and GIS. Apa NRV is located in the municipality of Mambaí Go, in the northeast portion of the state. It has an area of over 176 thousand hectares, and is comprised in the Tocantins Hydrographic Basin. In the first stage of the research, a bibliographical survey was carried out, through which two scientific articles were prepared, one revising the theory and the other revising the methodology. To perform this step, we opted for searching indexed articles with a minimum Qualis A2. In the second stage of the research, after obtaining the field and laboratory data, the results article was elaborated, through which it was explained about the results of surface collections, landscape analysis, morphological descriptions, spectroradiometry and georadar. Using tools made available in Envi 5.3, it was possible to create a colorful composition image composed of elevation, slope and aspect, and to classify soils based on decision trees, creating an equation for each soil described. The pedological map showed a satisfactory result, so that all control points were coincident with the classification presented.

Keywords: Pedological Mapping; Direct and Indirect Methods; Karst.

CAPÍTULO 1 (APRESENTAÇÃO DA PESQUISA)

Este trabalho tem por escopo realizar um mapeamento de solos baseado em análises pedológicas diretas em campo e técnicas auxiliares dentre elas a geofísica rasa e o geoprocessamento. O local da pesquisa é a Área de Proteção Ambiental Nascentes do Rio Vermelho (APA - NRV), que se trata de uma unidade de conservação de uso sustentável gerenciada pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), criada em 2001 com o objetivo de organizar a ocupação das áreas de influência do patrimônio espeleológico, com intuito de evitar a degradação dos solos e recursos hídricos. Antes de iniciar a pesquisa se faz necessário entender que o conceito de solo é amplo. Segundo o conhecimento popular, solo é qualquer superfície do planeta Terra (ou outros), composta por algum tipo de material desagregado, compactado ou não. Mas cada ciência que estuda a pedologia (Agronomia, Engenharia Civil ou Florestal, Geografia, Geologia, etc.), apresentam visões diferentes sobre as definições, conceitos e utilização do solo.

A Ciência do Solo o entende como um recurso natural, produto do intemperismo de rochas, e para a sua classificação leva em consideração além do material de origem, atributos físicos, químicos, biológicos, fertilidade além do uso e manejo (Lepsch, 2011).

Um conceito antigo e clássico que classifica o solo de maneira consistente é a definição abordada pelo Soil Survey Manual (1951), “a coleção de corpos naturais que ocupam partes da superfície terrestre, os quais constituem um meio para o desenvolvimento das plantas e que possuem propriedades resultantes do efeito integrado do clima e dos organismos vivos, agindo sobre o material de origem e condicionado pelo relevo durante um certo período de tempo”.

Todo plano de conservação e manejo de uma área de preservação tem como um dos focos mapeamento do solo, que irá servir como base para as demais pesquisas. E este trabalho se propõe a utilizar técnicas diretas e indiretas de mapeamento para produzir um mapa de solos, e assim compor o projeto de “Susceptibilidade, Hidrologia e Geomorfologia Cárstica Aplicadas à Conservação do Patrimônio Espeleológico da Área de Proteção Ambiental das Nascentes do Rio Vermelho” (Termo de Compromisso de Compensação Espeleológica- TCCE nº 01/2018/ICMBIO), coordenado pelo professor do programa de Pós Graduação em Geografia – UNB, Dr. Rogério Uagoda.

No decorrer da pesquisa estabeleceu-se metas a serem cumpridas de acordo com o cronograma, conforme se alcançavam os objetivos de cada fase proposta, elas passaram a ser referenciadas como etapas.

A organização em etapas se iniciou com pesquisas dos materiais bibliográficos para fornecer suporte às metas seguintes. As etapas foram organizadas na seguinte cronologia: elaboração dos artigos de revisão; campos para coletas de materiais e dados; processamento de dados e análises laboratoriais envolvendo as amostras coletadas para a geração de resultados e artigos de resultados.

O desenvolvimento em formato de artigos científicos torna a pesquisa mais didática e facilita o acesso de outros usuários. Os artigos teóricos e metodológico integram o capítulo 1 (teoria e da metodologia aplicada ao mapeamento de solos respectivamente), e com os dados obtidos foi desenvolvido um artigo de resultados para compor o capítulo 2.

O primeiro artigo elaborado teve por objetivo buscar indexações já publicadas, dissertações e teses que trabalharam com o desenvolvimento de solos em áreas cársticas, e obter um entendimento de como os solos destes ambientes se enquadram nos grupos hidrológicos de solo existentes. Esta revisão foi alvo de avaliação durante a qualificação da pesquisa, sendo submetida à Revista Caminhos da Geografia, e rejeitado posteriormente, e será feita uma nova submissão a Revista Brasileira de Geografia Física.

O segundo artigo traz informações sobre algumas das metodologias indiretas que tem sido utilizadas para o mapeamento pedológico, dentre elas: Sensoriamento Remoto, Sistema de Informações Geográficas (SIG), Mapeamento Digital de Solos (MDS), Georadar (GPR), Espectrorradiometria (medidas radiométricas em ambientes controlados). Esta pesquisa embasou-se em uma breve revisão teórica, e funcionamento da técnica, aplicações do método voltadas para a pedologia, e a existência ou não de uma padronização no processamento dos dados ou na utilização do método, assim como de uma base de dados internacional. Esse artigo foi submetido à Revista Brasileira de Geografia Física e obteve parecer favorável a publicação, após revisões.

O capítulo 3 traz uma síntese dos resultados sob a forma de artigo, utilizando-se dos dados de campo como base e confirmação das informações, dando suporte as técnicas indiretas de mapeamento. O artigo trará como produto principal o mapa de solos da APA NRV, com nível de detalhes e escala melhorados, além dos dados de geofísica rasa, espectrorradiometria, fertilidade e granulometria.

Área de Estudo

A Apa Nascentes do Rio Vermelho é uma unidade de conservação de uso sustentável criada em 2001, com a finalidade de proteger o patrimônio espeleológico e melhorar a gestão dos recursos hídricos. A região abrange uma área de 176.324,33 hectares, localizada no município de Mambai-Go, porção nordeste do estado, a uma distância de 509 Km de Goiânia e 301 Km de Brasília fazendo fronteira com a Bahia.

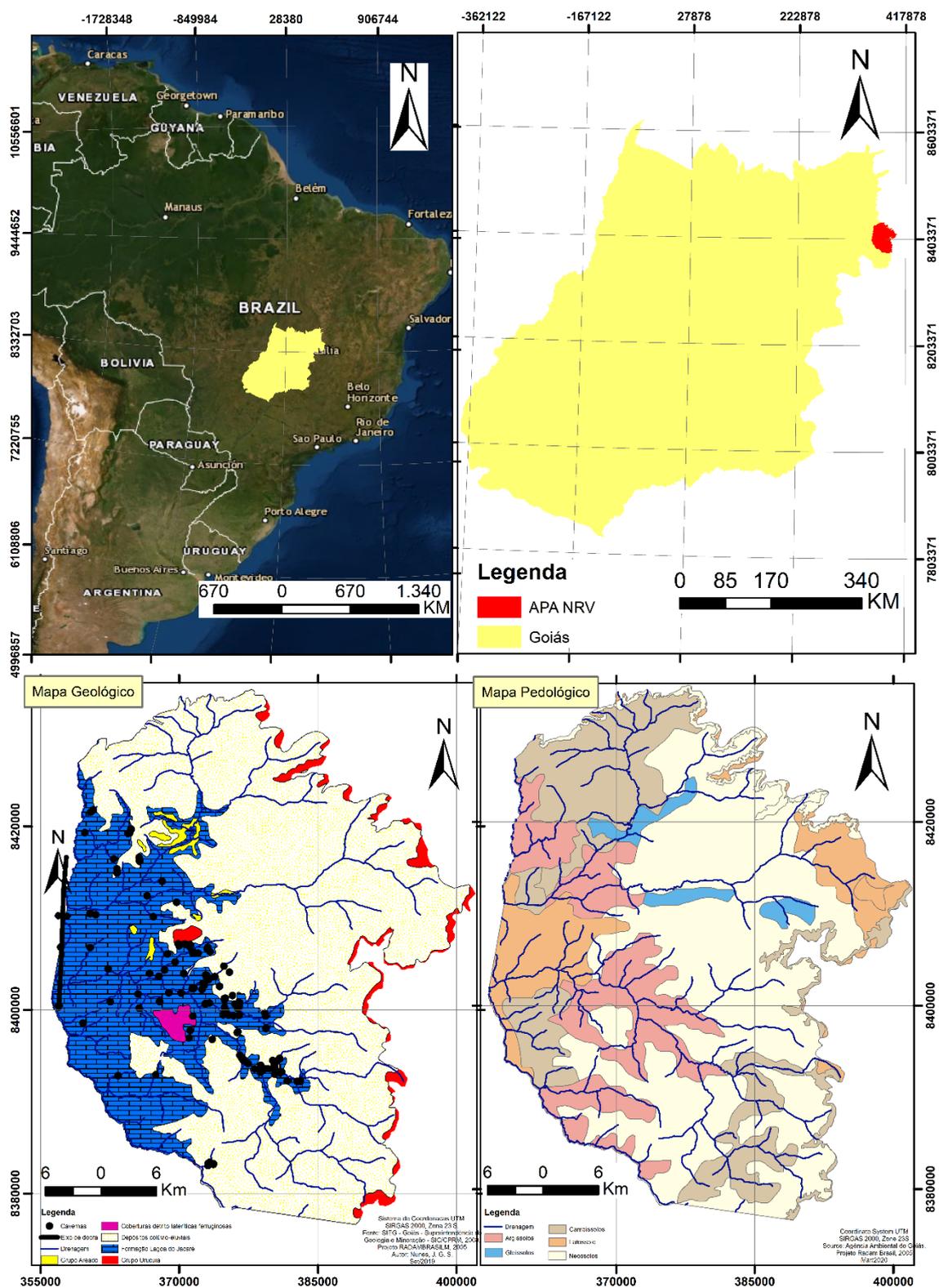


Figura 1. Mapa de localização, geologia e pedologia utilizados como base para APA NRV.

As características climáticas da APA são inerentes ao clima tropical, com duas estações definidas, uma fria e seca, e outra quente e úmida. A área está compreendida na Bacia Hidrográfica do Tocantins. A vegetação presente é o cerrado. O contexto geomorfológico é retratado por Cherem e Varajão (2014), apresentado duas compartimentações separadas por uma cuesta. A porção superior (Chapadão Central) é um remanescente da superfície

Sulamericana, (representada pelos arenitos do Grupo Urucuia) e a porção inferior (Vão do Paranã) remanescente da superfície Velhas, representada por rochas do Grupo Bambuí. Através de algumas visitas de campo, foi possível confirmar a presença de algumas litologias do Grupo Urucuia, como a Formação Posse, apresentando arenitos de matriz basicamente quartzosa, cor esbranquiçada e grandes estratificações cruzadas informando um ambiente de deposição eólico, e sobreposta a esta encontra-se a Formação Serra das Araras apresentando arenitos avermelhados com morros testemunhos suportados por camadas espessas de carapaças lateríticas, a composição avermelhada indicando a presença de argilas e os clastos arredondados indicam o transporte fluvial. Estas formações foram previamente descritas por Campos e Dardenne, 1997. Com a erosão da Formação Capacete, os arenitos do Grupo Areado, e uma grande porção de pelitos e carbonatos da Formação Lagoa do Jacaré pertencentes ao Grupo Bambuí ficaram expostos na superfície (CAMPOS & DARDENNE, 1997).

Para o mapeamento da área estudada, buscou-se integrar técnicas diretas de mapeamento, com procedimentos de campo adotados pela Embrapa (2018), com descrição morfológica do perfil dos solos encontrados na área, além de análises físicas, químicas e mineralógicas, para comparação e validação das técnicas indiretas no que se refere ao mapeamento digital de solos (MDS), georadar (GPR), espectrorradiometria, granulometria e geoquímica.

O mapa apresentado (Figura 1), contém informações da base de dados do Sistema Estadual de Estatística e Informações Geográficas do Estado do Goiás (SIEG), cujo a fonte de informações pedológicas foram obtidas da Agência Ambiental do Goiás (atualizadas do programa RADAMBRASIL), e as informações geológicas são do SIG-Goiás - Superintendência de Geologia e Mineração – SIC/ CPRM, 2008. O mapa pedológico foi compartimentado de acordo com a geologia, os Argissolos e algumas porções de Latossolos foram enquadradas nos domínios de rochas carbonáticas da APA. Extensas áreas que apresentam rochas do Grupo Urucuia (Formação Posse e Serra das Araras) e em menor proporção do Grupo Areado estão mapeadas geologicamente como colúvios-eluviais, e generalizadas no mapa de solos como Neossolos.

Pergunta e objetivos

Como apresentado no mapa geológico e pedológico da figura 2, a base de informações contidas nos órgãos e agências governamentais são insuficientes para uma gestão eficiente da APA NRV, e o sistema cárstico torna a região mais sensível e vulnerável a ação antrópica, motivo pelo qual se faz necessária um levantamento pedológico minucioso, e uma mapa na escala de detalhes. Mas a carência de pesquisas justamente em áreas de feições carsticas, surgem algumas dúvidas sobre: como fazer um levantamento eficiente dos solos em áreas com um grande “gap” na instrumentalização? Técnicas geofísicas como Georadar (GPR) são eficientes para mapear a interface solo/rocha (epicarste)? Se sim para a pergunta anterior, qual deve ser a frequência da antena utilizada? Outras técnicas podem ser utilizadas para integrar o Mapeamento Digital de Solos (MDS)? Quais?

Um sistema semi-automatizado para mapeamento de solos não é incomum, e alguns autores trabalham com este método desde o início dos anos 2000, apesar de a primeira publicação brasileira envolvendo esta ferramenta, aparecer em revistas científicas apenas em 2006, muitos pesquisadores se utilizaram do método no país. Um computador não é capaz de pensar, mas de distribuir dados de acordo com funções matemáticas, aproximando modelos que chegam próximos a realidade, mas há uma incógnita se tipo de ferramenta funcionará em áreas cársticas, que podem apresentar variações composicionais abruptas, maior variabilidade nos materiais pedológicos, e comportamento hidrológico e hidrogeológico diferentes dos modelos tradicionais conhecidos.

O objetivo geral desta pesquisa é gerar um Mapa de solos da região da APA NRV, através de técnicas indiretas de mapeamento (MDS; GPR; Espectrorradiometria), com a validação dos métodos tradicionais de mapeamento (Descrições Morfológicas; Coleta; Análises Laboratoriais).

Os objetivos específicos, vão de encontro à validação das técnicas indiretas utilizadas, como também na comparação e análise dos dados obtidos, podendo ser categorizados em:

- Analisar a eficiência do GPR para investigar a profundidade dos solos de maneira indireta e sua relação com o carste subjacente;
- Associar a resposta espectral, de acordo com a curva gerada, a cada tipo de solo mapeado, e verificar se as curvas espectrais das rochas-fontes podem indicar alguma similaridade com o material pedogenético desenvolvido a partir delas;
- Verificar se padrões morfológicos descritos apresentam correlação com diferentes unidades geomorfológicas.

CAPÍTULO 2 (ARCABOUÇO TEÓRICO/METODOLÓGICO)

Neste capítulo serão desenvolvidos dois artigos de revisão da teoria e da metodologia respectivamente, sendo que o primeiro artigo, que foi submetido a Revista Caminhos da Geografia (pág. 14 – 31), deverá buscar um entendimento do desenvolvimento pedológico e do comportamento hidrológico em carste tropical, para tal entendimento deve se conhecer como se comportam os grupos hidrológicos, mensurar a contribuição das rochas carbonáticas para solos formados nestes ambientes, e organizar os trabalhos brasileiros que desenvolveram algum tipo de pesquisa de solo em área cárstica em um mapa nacional. O segundo artigo, que se pretende submeter a Revista Brasileira de Geografia Física (pág. 32 – 54) deverá investigar quais técnicas são aplicáveis para o mapeamento digital de solos, como o GPR e a Espectrorradiometria podem contribuir para o mapeamento indireto de solos, e suas possíveis associações com as técnicas convencionais. Também deverá verificar se existem padronização no processamento de dados dos métodos ou bases globais de dados que possam facilitar o manuseio dos dados e resultados produzidos por esta pesquisa. As pesquisas forma embasadas principalmente por artigos científicos indexados, e secundariamente em livros, teses, dissertações, etc.



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Solos Em Carste Tropical, Desenvolvimento Pedogenético E Comportamento Hidrológico: Uma Revisão Teórica.

José Gustavo da Silva Nunes¹, Rogério Uagoda²,

¹ Mr. em Análise de Sistemas Naturais pelo programa de Pós-Graduação em Geografia (UnB), Bacharelado e Licenciatura em Geografia (UnB), Geologia (UnB). Departamento de Geografia, Universidade de Brasília Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília, Distrito Federal. CEP: 70910-900. Brasil. (61) 31077257. jgustavosn@gmail.com ² Dr. Pesquisador, Departamento de Geografia, Universidade de Brasília Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília, Distrito Federal. CEP: 70910-900. Brasil. (61) 31077257. rogeriouagoda@unb.br

Artigo recebido em 12/04/2020

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo reunir informações sobre comportamento pedogenético e hidrológico em áreas de rochas carbonáticas de clima tropical. A execução desta pesquisa foi embasada em artigos científicos indexados, nacionais e internacionais, como também em livros, teses e dissertações relevantes para o tema proposto. O solo é um sistema multifásico, e os seus aspectos morfológicos e constitucionais atuam facilitando ou dificultando a permeabilidade da água, assim cada horizonte pedológico funciona como um mecanismo em um mesmo perfil de solo. Os fatores físicos/químicos da água também atuarão contribuindo para a classificação dos grupos hidrológicos de solo. No Brasil, a Embrapa realizou classificações dos horizontes diagnósticos, dos grupos hidrológicos e dos tipos de solos, baseada em autores internacionais, adaptadas às condições tropicais. Mas as áreas cársticas, que representam um percentual de 20% da superfície terrestre, podem apresentar condições particulares para a formação de solo e para o comportamento hidrológico, podendo incluir zonas locais de alta permeabilidade, fuga de água subterrânea e eliminação de resíduos insatisfatórios. Solos de ambientes cársticos são mal desenvolvidos, apresentam argilas avermelhadas de baixa atividade normalmente. No Brasil os estudos deste tipo de ambiente são escassos, mas alguns trabalhos desenvolvidos em áreas cársticas trazem algumas informações básicas sobre os solos. As pesquisas encontradas que trouxeram informações dos solos em carstes, foram plotadas no mapa brasileiro. A pesquisa demonstrou que há um gap de informações para o desenvolvimento pedológico em áreas cársticas, mas é possível fazer associações entre estas classes de solo a outros ambientes, incluindo o comportamento hidrológico.

Palavras-chave: Grupos hidrológicos de solos, Solo Tropical, Carste.

Soils In Tropical Karst, Pedogenetic Development And Hydrological Behavior: A Theoretical Review

ABSTRACT

This work aimed to gather information on pedogenetic and hydrological behavior in carbonate rock areas of tropical climate. The execution of this research was based on indexed scientific articles, national and international, as well as on books, theses and dissertations relevant to the proposed theme. The soil is a multiphase system, and its morphological and constitutional aspects act to facilitate or hinder water permeability, so each pedological horizon works as a mechanism in the same soil profile. The physical / chemical factors of the water will also act contributing to the classification of soil hydrological groups. In Brazil, Embrapa carried out classifications of diagnostic horizons, hydrological groups and soil types, based on international authors, adapted to tropical conditions. However, karst areas, which represent a percentage of 20% of the earth's surface, may present particular conditions for soil formation and hydrological behavior, and may include local areas of high permeability, groundwater leakage and unsatisfactory waste disposal. Soils in karst environments are poorly developed, with reddish clays of low activity normally. In Brazil, studies of this type of environment are scarce, but some studies carried out in karst areas bring some basic information about the soils. The researchers found that brought information on soils in carstes, were plotted on the Brazilian map. Research has shown that there is an information gap for pedological development in karst areas, but it is possible to make associations between these soil classes and other environments, including hydrological behavior.

Keywords: Soil Hydrological Groups; Tropical Soil; Karst.

Introdução

Áreas cársticas fazem parte de um tipo específico de paisagem na qual o intemperismo químico determina as formas de relevo, desenvolvido através da dissolução da rocha encaixante. O termo “carste” tem origem em uma área no leste da Eslovênia, divisa com o norte da Itália, chamada "krs" e significa paisagem nua, pedregosa, sem água (JONES et al, 2003). Logo a classificação se aplicaria para rochas que de alguma forma pudessem reagir e serem solubilizadas, mas ainda na década de 1980, feições cársticas desenvolvidas em rochas consideradas não solúveis como quartzitos e granitos, foram identificadas por pesquisadores em outras regiões do planeta (CHALCRAFT; PYE, 1984; YOUNG, 1986; DOERR, 1999; WILLEMS et al, 2002). O objetivo deste trabalho é de estudar solos desenvolvidos especificamente em rochas carbonáticas em áreas tropicais, e seu comportamento hidrológico.

Os Solos desenvolvidos em áreas cársticas não são incomuns, tendo em vista que as rochas carbonáticas recobrem 20% da superfície do planeta livre de gelo (FORD & WILLIAMS, 1989). Mas as pesquisas que buscam o entendimento de desenvolvimento pedológico e do comportamento hidrológico, em ambientes cársticos, são ínfimos.

O processo de desintegração das rochas ocorre de forma natural, quando estas são sujeitas a ações da atmosfera terrestre, provocando uma

série de alterações físicas e químicas, em maior ou menor intensidade dependendo da localização, condição climática e da paragênese mineral (LEPSCH, 2011).

O solo é produto da ação concomitante do clima e de organismos que atuam desgastando material de origem (rocha), que a depender do tipo de relevo, pode intensificar ou retardar o processo. Todos estes fatores devem ter uma continuidade ao longo do tempo para desenvolver um perfil do solo. Durante sua formação, o solo poderá passar por processos de desenvolvimento como perdas, transformações, translocações e adições (LEPSCH, 2011).

Segundo Young e Crawford (2004) os solos constituem os sistemas ambientais mais complexos devido a diversidade de processos e interações envolvidos em sua formação. Por se tratar de um sistema aberto com contínuo fluxo de massa dentro e fora do sistema em diversas fases (líquido, gasoso e sólido), estes sistemas são muito sensíveis as interferências antrópicas devido ao manejo e uso do solo. Foth e Schafer (1980), através de análises de processos pedogenéticos, aspectos morfológicos e constitucionais, propuseram classificações no que se refere à horizontes diagnósticos superficiais, mas estes horizontes tiveram que ser adaptados para condições de clima tropical, como é demonstrado nas Figura 2 e Figura 3, exceto para o horizonte antrópico que é criado ou modificado pelo homem.

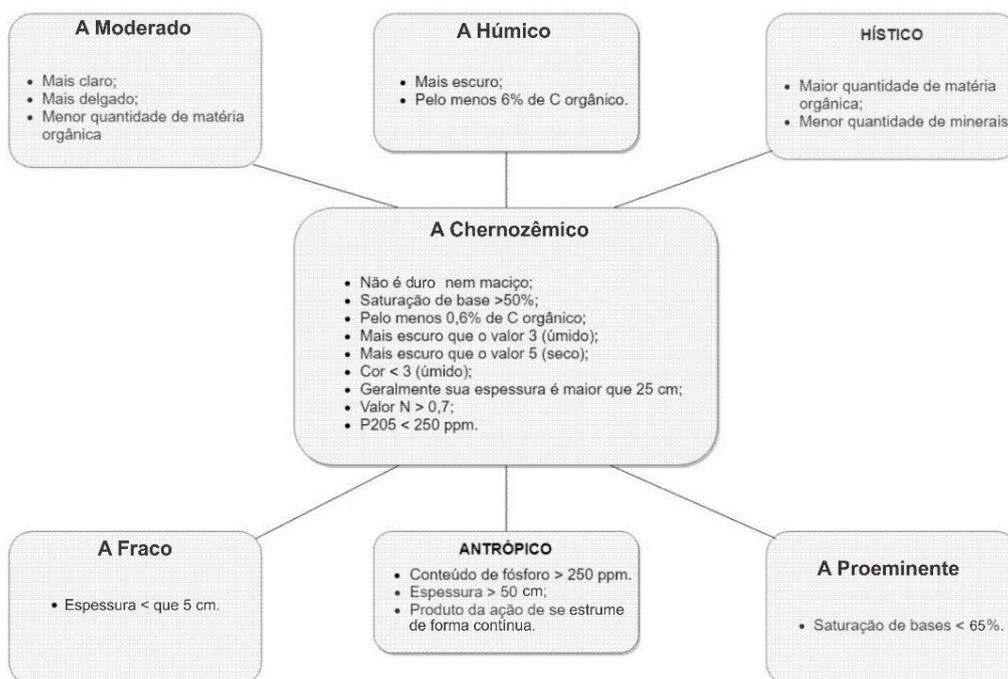


Figura 2. Principais Horizontes diagnósticos superficiais. Fonte: FOTH & SCHAFFER, 1980. Adaptado pelo autor para o SIBCS. Nunes, J. G. S.; Uagoda, R.

Foth e Schafer (1980), também descreveram 18 horizontes diagnósticos subsuperficiais, porém nem todos se aplicam para áreas de clima tropical, sendo apenas seis horizontes são representativos para esta faixa de clima (e.g. B textural (Bt), B latossólico (Bw), B incipiente (Bi), B nítico (Bt), B espódico (Bs, Bhs, Bh), B plânico, E alábico (E), Plíntico, Concessionário, Litoplíntico, Glei, Cálcico, Petrocálcico, Sulfúrico, Vértico, Fragipã, Duripã) nos quais foram descritos suas composições devido aos processos de adição, remoção e transformação.

Os horizontes minerais (e.g. Chernozêmico, Duripã, Fragipã, B Espódico, Nátrico) foram definidos através da quantidade de carbono orgânico nas frações húmicas e características diferenciais de teores minerais de solos (FOTH & SCHAFFER, 1980). Os outros horizontes são demonstrados na Figura 3, desenvolvidos através de perda ou enriquecimento em determinados elementos.

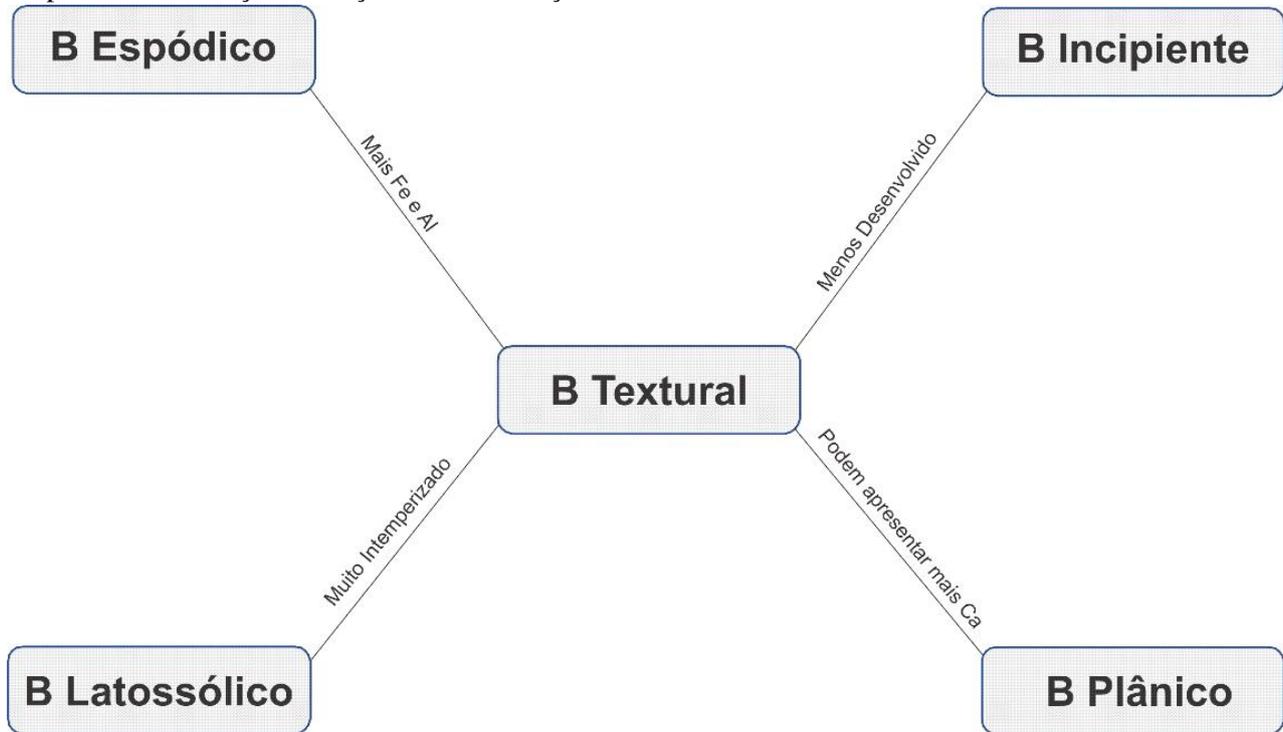


Figura 3. Horizontes diagnósticos subsuperficiais. Fonte: FOTH & SCHAFFER, 1980. Adaptado pelo autor para o SIBCS.

Foth e Schafer (1980), também definiram os regimes de temperatura dos solos, baseado em monitoramentos a uma profundidade de 50 cm da superfície do solo. Estes regimes afetam fortemente o uso e manejo dos solos, particularmente na seleção de plantas adaptadas. Os regimes de temperatura do solo são:

- Pergélico – temperatura média anual menor que 0° C;
- Frígido – temperatura média anual menor que 8° C;
- Mesotérmico – temperatura média anual entre 8 e 15° C;
- Térmico – temperatura média anual entre 15 e 22° C;
- Hipertérmico – temperatura média anual superior a 22° C.

Como também foram definidos regimes de umidade, de acordo com a presença ou ausência de água na seção controle de umidade (FOTH & SCHAFFER, 1980). Segundo Foth e Schafer (1980), devido a variação composicional das classes de solos (e.g. mineral e quantidade de matéria orgânica, embasamento cristalino), eles vão apresentar comportamentos químicos e físicos heterogêneo na sua relação com a água:

- Áquico – o solo permanece a maior parte do ano saturado com água;
- Údico – o solo permanece úmido a maior parte do ano;
- Ústico – regime intermediário entre o Údico e arídico;
- Arídico – o solo permanece seco a maior parte do ano.

Propriedades Físicas e Químicas da Água

Segundo Brady (1984), a polaridade da água explica o porquê suas moléculas são atraídas por íons carregados eletrostaticamente e por superfícies coloidais. Cátions tais como H⁺, Na⁺, K⁺ e Ca²⁺ tornam-se hidratados devido a sua atração pelo oxigênio (negativo) na extremidade da molécula de água. Do mesmo modo, superfícies das argilas carregadas negativamente atraem a água, através do hidrogênio (positivo) na extremidade da molécula. Esta interação se torna ainda mais complexa quando se trata de sua relação com os solos.

Segundo Brady (1984) As pontes de hidrogênio determinam as duas forças básicas responsáveis pela retenção e movimento da água no solo, a atração entre moléculas de água (coesão) e atração das moléculas de água pelas superfícies sólidas (adesão). O autor afirma ainda que as moléculas de água são retidas nas superfícies dos poros dos solos por adesão, que junto com a força da atração, explica o movimento ascendente da água como capilaridade. Explica ainda a atração da água por superfícies sólidas (adesão ou adsorção) e a tensão superficial da água que é devida à atração entre as moléculas de água (coesão).

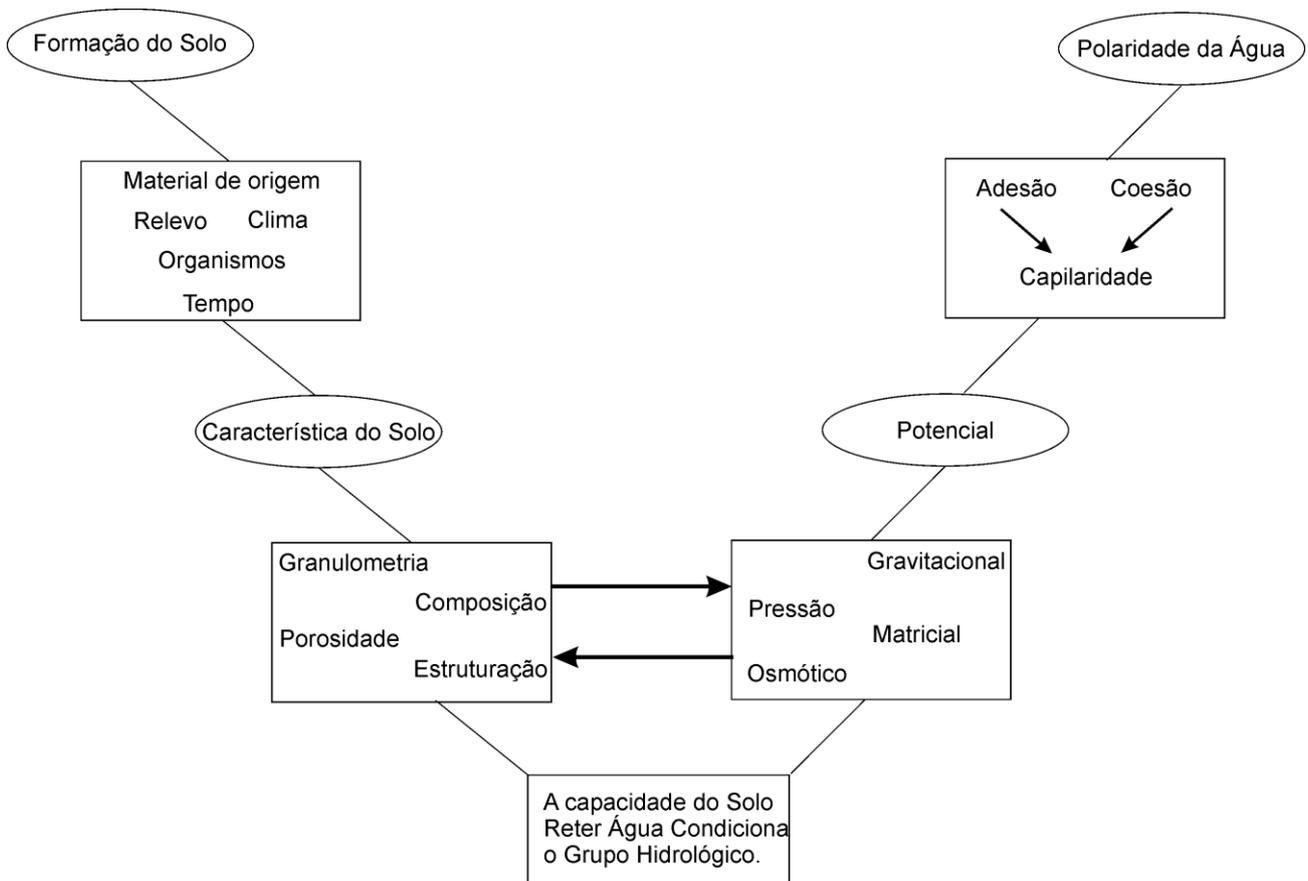


Figura 4. Organograma das propriedades e interações básicas entre água e solo, abordando de forma sequencial e esquemática as propriedades físicas e, como elas interagem para que ocorra a retenção da água pelo solo.

Forças capilares são atuantes em todos os solos úmidos, no entanto, a taxa de movimento e a ascensão são menores do que se espera, considerando apenas o diâmetro dos poros do solo (BRADY, 1984). Uma das razões propostas pelo autor é que os poros do solo não são uniformes como tubos de vidro. Além disso, alguns poros contêm ar aprisionado diminuindo ou impedindo o movimento capilar da água. O autor apresenta uma correlação entre texturas finas como inversamente proporcional à velocidade do fluxo de fluidos.

Segundo dados de Gleick (1996), o volume global de umidade nos solos corresponde à 16.500 Km³, representando 0,001% do total de água do planeta. Sendo que parte desta água abastece os aquíferos que comportam 23.400.000 Km³ ou 1,7% do volume de água, rios com 2.120 Km³ ou 0,0002%, e pântanos com 2.100 Km³ ou 0,0008% do total de água do planeta.

As áreas cársticas (Figura 5), que se formam devido a dissolução da calcita e dolomita presente em rochas carbonáticas, correspondem a

cerca 20% do total da superfície do planeta, livre de gelo (FORD & WILLIAMS, 1989). Mesmo cobrindo uma parcela significativa da Terra, quando os grupos hidrológicos de solos foram

pensados, não se levou em consideração o comportamento hidrológico para coberturas pedológicas que recobrem estas áreas.

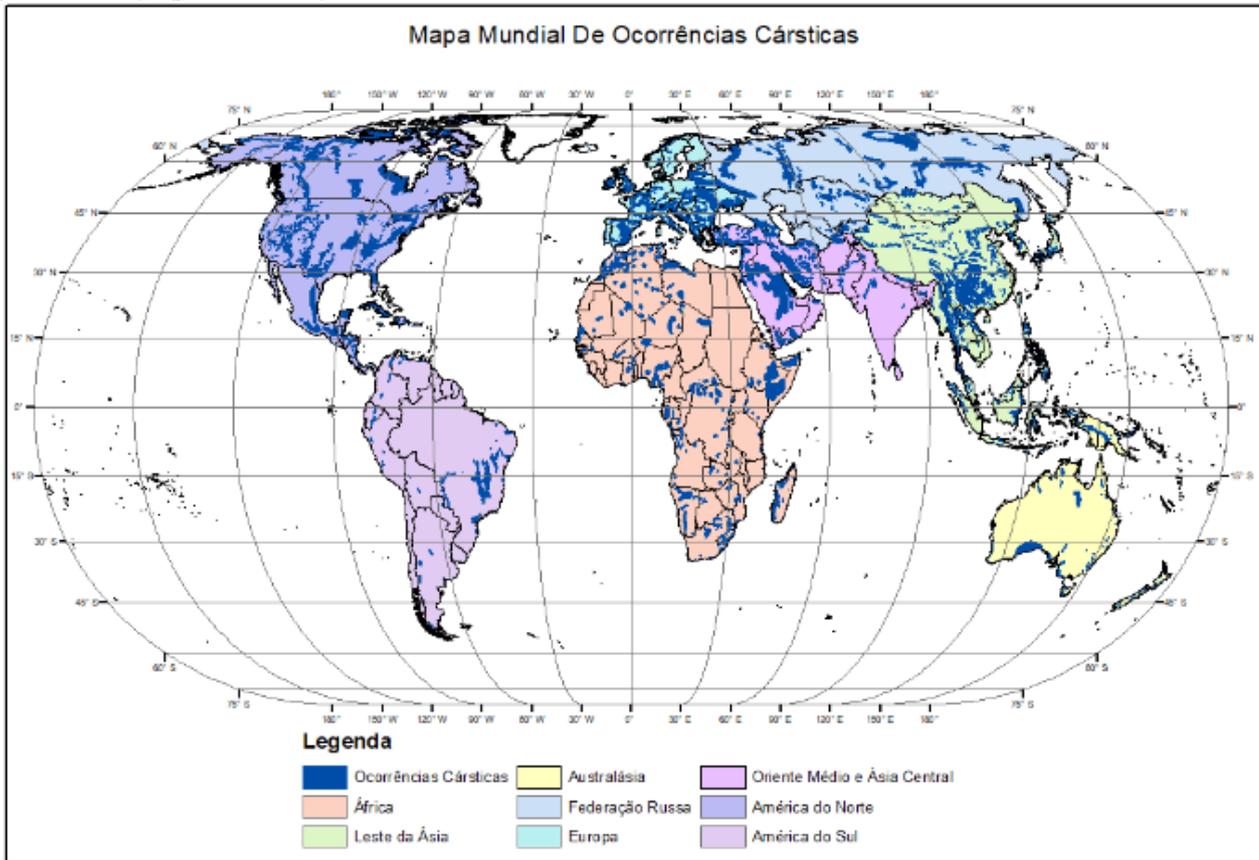


Figura 5. Mapa mostrando áreas cársticas em todo o planeta. Fonte: Produzido pelo autor com base nos dados da Universidade de Auckland.

Grupos Hidrológicos de Solos

Os solos foram originalmente reunidos em grupos hidrológicos, baseados em monitoramentos da precipitação, escoamento superficial e dados de infiltração (MUSGRAVE, 1955). Segundo NEH (2009), para o caso de solos não monitorados foram estabelecidos. A maioria dos agrupamentos são baseados na premissa de que os solos, encontrados dentro de uma mesma região climática, são semelhantes em profundidade para uma camada restrita ou lençol freático, taxa de transmissão de água, textura, estrutura, e grau de dilatação quando saturado, e que também terá respostas de escoamento semelhantes. As classes são baseadas nos seguintes fatores:

- Absorção e transmissão de água sob condições de máxima precipitação anual (completamente encharcado);
- Solo não congelado;
- Superfície de solo exposto;
- Grau de expansão das argilas.

Estes fatores devem ser revistos para solos tropicais, pois alguns não se aplicam às condições climáticas brasileiras. Além disso, a inclinação da superfície do solo não é considerada ao classificar grupos hidrológicos de solos (NEH, 2009).

De forma simplificada, grupos hidrológicos de solo são determinado pela taxa de transmissão de água (condutividade hidráulica) da camada de solo não saturada com a taxa mínima da condutividade hidráulica para o lençol freático (camada saturada) (Figura 6). Sendo que a camada menos transmissiva pode ser qualquer horizonte de solo que transmite água em um ritmo mais lento para horizontes acima ou abaixo (NEH, 2009). Assim foram definidos quatro grupos hidrológicos de solo:

- Grupo A Compreende os solos com baixo potencial de escoamento e alta taxa de infiltração uniforme quando completamente molhados, em geral apresentam menos de 10% de argila e mais de 90% de areia ou cascalho. A condutividade

hidráulica excede os 40 micrometros por segundo (0,04 mm/h), quando a profundidade da camada impermeabilizante é superior a 50 cm, e do lençol freático é maior que 60 cm, os solos contém mais de 1 m de profundidade.

- Grupo **B** apresenta solos com potencial de escoamento moderadamente baixo quando encharcado, sendo que estes solos apresentam entre 10 a 20% de argila, e de 50 a 90% de areia, podendo conter carbonato marga, sendo bem agregados e de baixa densidade aparente, podendo ser composto por mais de 35% de fragmentos de rocha. Em condições na qual a profundidade da camada menos transmissiva fica a aproximadamente 50 cm, e a condutividade fica entre 10 e 40 micrometros por segundo ($> 0,01$ à $\leq 0,04$ mm/h). A profundidade do lençol freático é superior a 60 cm, a condutividade geralmente fica entre 4 e 10 micrometros por segundo.

- Grupo **C** apresenta solos com potencial de escoamento moderadamente elevado, quando encharcado, com baixa taxa de infiltração. Apresentam em sua composição de 20 a 40% de argila e menos de 50% de areia contendo marga. Alguns solos com texturas argilosas, silte/argilosa, areia/argilosa podem ser colocados neste grupo se forem bem agregados, de baixa densidade ou conter mais de 35% de fragmentos de rocha. A

saturação da condutividade hidráulica da camada menos transmissiva deve estar entre a superfície e 50 centímetros, e entre 1 e 10 micrometros por segundo ($> 0,001$ à $\leq 0,01$ mm/h). A profundidade da camada impermeabilizante deve ser maior que 50 cm. A profundidade do lençol freático deve ser maior que 60cm. Solos com profundidade superior a 100 centímetros com um confinamento e um lençol freático são do grupo **C** se a saturação hidráulica de todas as camadas de solo à 100 cm da superfície excederem 0,4 micrometros por segundo, mas deve ser inferior a 4 micrometros por segundo.

Os solos do grupo **D** apresentam um elevado potencial de escoamento quando encharcados. O movimento de água através deste solo é restrito ou muito restrito. Eles contém mais de 40% de argila e menos de 50% de areia, com alto potencial de expansão. Fazem parte destes grupos solos com permanência elevada do lençol freático. Os limites das características físicas destes solos são: a profundidade da camada impermeabilizante deve ser entre 50 e 100cm; a saturação hidráulica da camada menos transmissiva é menor que 1 micrometro por segundo ($\leq 0,001$ mm/h).

Grupos:

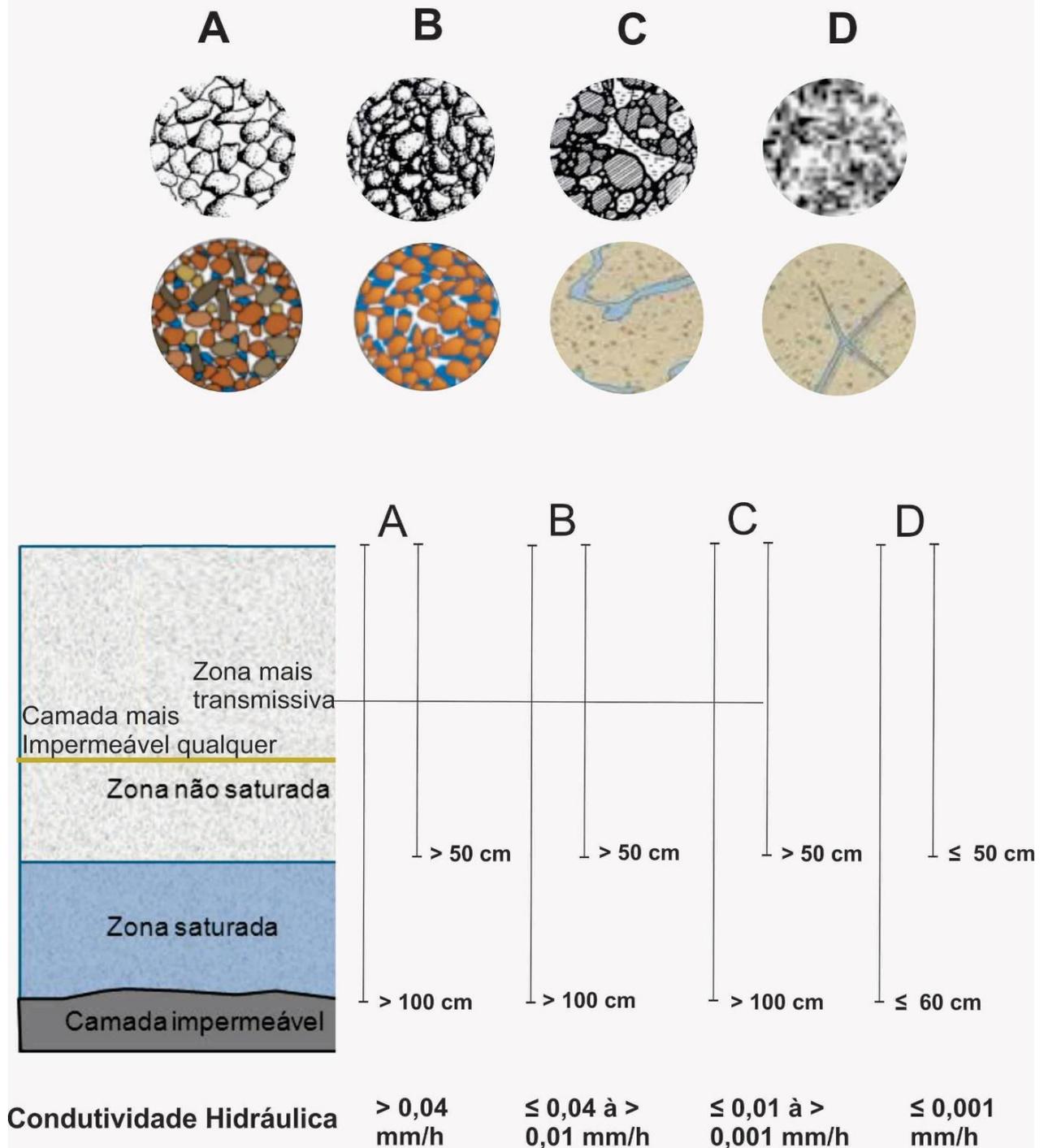


Figura 6. Condições e propriedades do solo para classificação dos Grupos Hidrológicos.

Certas classes de solos são colocadas no Grupo D devido a presença do lençol freático a 60 cm de profundidade, mesmo que a saturação da condutividade hidráulica seja favorável para a

infiltração de água. Porém se estes solos puderem passar pelo processo de drenagem adequada, então eles são atribuídos a 2 grupos hidrológicos de solo (NEH, 2009).

Tabela 1. Critérios para atribuição de grupos de solos hidrológicos quando existe uma camada impermeável a uma profundidade entre 50 e 100 centímetros.

Propriedade do solo	Grupo hidrológico de solo A	Grupo hidrológico de solo B	Grupo hidrológico de solo C	Grupo hidrológico de solo D
Condutividade hidráulica da camada menos transmissiva saturada	> 0,04 mm/h	≤ 0,04 à > 0,01 mm/h	≤ 0,01 à > 0,001 mm/h	≤ 0,001 mm/h
	e	e	e	E
Profundidade da água na camada impermeável	50 à 100 cm	50 à 100 cm	50 à 100 cm	≤ 50 cm
	e	e	e	E
Profundidade do lençol freático	60 à 100 cm	60 à 100 cm	60 à 100 cm	≤ 60 cm

Fonte: NEH (2009), adaptado pelo autor.

Tabela 2. Critérios para atribuição de grupos de solos hidrológicos quando existe uma camada impermeável a uma profundidade maior que 100 centímetros.

Propriedade do solo	Grupo hidrológico de solo A	Grupo hidrológico de solo B	Grupo hidrológico de solo C	Grupo hidrológico de solo D
Condutividade hidráulica da camada menos transmissiva saturada	> 0,01 mm/h	≤ 0,01 à > 0,004 mm/h	≤ 0,004 à > 0,0004 mm/h	≤ 0,0004 mm/h
	e	e	e	E
Profundidade da água na camada impermeável	> 100 cm	> 100 cm	> 100 cm	> 100 cm
	e	e	e	E
Profundidade do lençol freático	> 100 cm	> 100 cm	> 100 cm	> 100 cm

Fonte: NEH (2009), adaptado pelo autor.

Segundo Zhang et al. (2018), mudanças na cobertura natural por uso da terra, e mudanças climáticas são os dois fatores mais importantes nas variações hidrológicas, podendo afetar a evapotranspiração, interceptação, infiltração e o escoamento superficial até alterar diretamente a morfologia e condições fisiológicas da paisagem e alterar indiretamente o solo e o limite das camadas atmosféricas. Logo, não se pode definir grupos hidrológicos como estruturas inalteráveis.

O solo é o principal limitador da água que está reservada em seu meio, e apenas uma parcela deste recurso fica disponível para as plantas. E por este motivo, no campo é necessário manter a umidade do solo em quantidades suficientes para que o recurso hídrico esteja em disponibilidade para as plantas (TÁRNÍK & LEITMANOVÁ, 2017). Com base nos dados da última pesquisa citada, foi possível observar os impactos das alterações climáticas na quantidade de água no solo. O trabalho também pode ser tomado como base para decisões de planejamento do manejo da paisagem, parcelamento ou irrigação.

Partículas como cinzas, produtos de queimadas, também provocam alterações significativas na hidrologia do solo. Para Thomaz (2018), áreas sujeitas à acumulação de camadas de cinzas, aumentam a complexidade dos processos hidrogeomorfológicos. Em tese a combinação de cinzas, microagregados e solos, resultam em possibilidades diversas para as camadas. Para o autor, possivelmente cinzas podem aumentar o fluxo na superfície da terra e a erodibilidade do solo, outro possível efeito na interação cinza solo seria a vedação superficial, entupindo os poros dos solos, e a formação de crostas que resultam em mudanças superficiais da hidrologia.

As queimadas por sua vez provocam vários efeitos nas propriedades físico-químicas do solo, uma das alterações mais relevantes destas propriedades é a criação de uma frente contínua, repelente à água, paralela à superfície, que diminui a permeabilidade do solo (Imeson et al. 1992). Robichaud (2000) mensurou que a redução na condutividade hidráulica causada no solo pelo efeito do fogo pode chegar a 40%. Segundo Mataix-Solera e Doerr (2004), a estabilidade da estrutura de microagregados podem aumentar sob efeito de incêndios, devido à formação do filme hidrofóbico na superfície externa nas estruturas,

enquanto que a estabilidade diminui drasticamente, devido às altas temperaturas desagregarem os cimentos orgânicos (Badí` a e Martí` 2003).

Microagregados, formados pela presença de outros compostos de origem diversa como cinzas originadas por queimadas ou vulcões, provocam alterações significativas no comportamento hidrológico do solo, de forma que deve ser dada uma atenção para áreas com potencial de acumulação destes compostos, principalmente áreas tropicais, de vegetação de savanas ou cerrado, nas quais ocorrem queimadas frequentes, devido a ação antrópica ou por causas naturais. Thomaz (2018), objetivou avaliar efeitos de microagregados e cinzas separadamente, e testar se a interação entre cinza/microagregados afeta hidrologia e erosão do solo, pois esta interação permanece pouco compreendida. Assim foram definidos quatro tipos de áreas: áreas sem microagregados e sem cinzas; áreas com microagregados; áreas com cinzas em concentrações de 600 g m²; e áreas com combinação de microagregados e cinzas. A partir dos resultados chegou-se à conclusão que a combinação entre microagregados e cinzas muda a hidrologia do solo com redução dinâmica da umidade do solo em torno de 28% e reduz o escoamento superficial em cerca de 78%, sendo que os microagregados no experimento apresentaram menor rendimento no escoamento e transporte de sedimentos.

Solos em áreas Cársticas

De acordo com à base de referência mundial para recursos do solo (IUSS, 2006), os solos que recobrem rochas calcárias e dolomíticas são compostos por argila avermelhada. Estes solos normalmente serão classificados como Neossolos Litólicos, Cambissolos, Luvisolos, Nitossolos e Vertissolos háplicos (Cromico). As taxas de dissolução da calcita na epicarste são altas, segundo White (1988), chegam a 0.1cm/ano. A zona denominada epicarste, segundo Ford e Williams (1991), compreende a faixa superior da rocha carbonática na qual ocorre a interface rocha/solo, onde a frente de intemperismo está atuando na formação e desenvolvimento do solo, podendo conter fissuras alargada por processos de carstificação, nas quais é drenada a água que entra no sistema e não é retida pelo solo, restando para o sistema somente a água do ponto de murcha permanente.

De acordo com à base de referência mundial para recursos do solo (IUSS, 2006), os solos que recobrem rochas calcárias e dolomíticas são compostos por argila avermelhada. Estes solos normalmente serão classificados como Neossolos

Litólicos, Cambissolos, Luvisolos, Nitossolos e Vertissolos háplicos (Cromico). As taxas de dissolução da calcita na epicarste são altas, segundo White (1988), chegam a 0.1cm/ano.

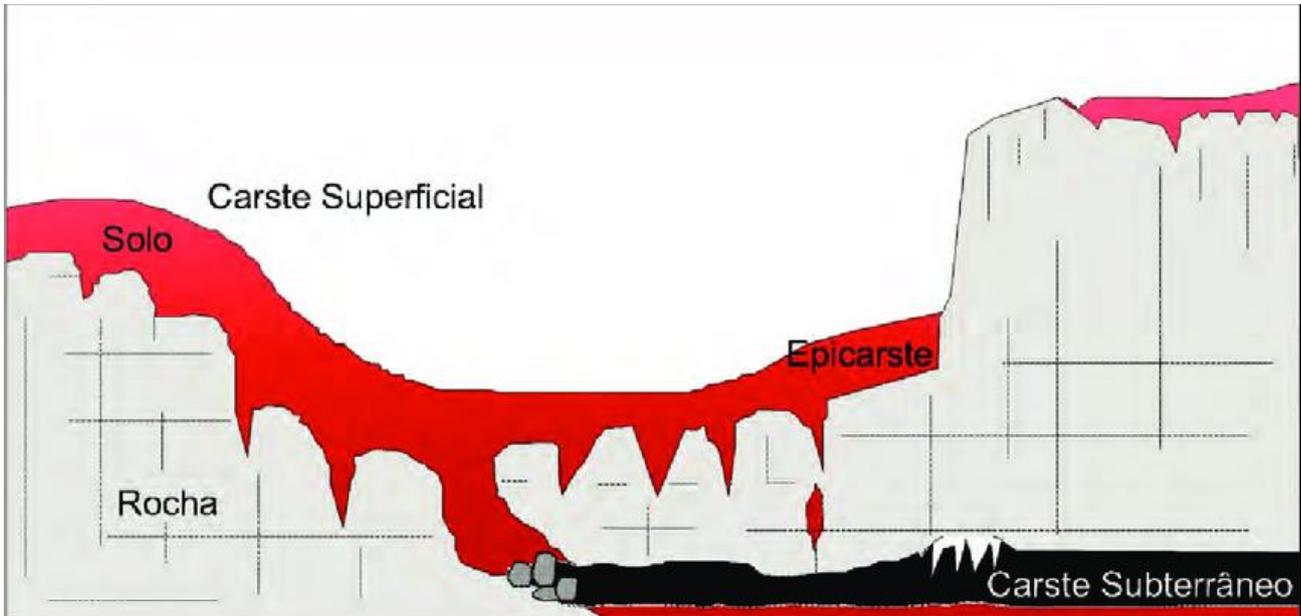


Figura 7. Representação esquemática de como solos podem estar dispostos em áreas cársticas. Fonte: Piló e Auler, 2013.

A tendência das rochas carbonáticas para desenvolver zonas locais de alta permeabilidade causa muitos problemas, incluindo a fuga de água subterrânea que resulta em escassez e baixa previsibilidade de abastecimento de água subterrânea, escassez de fluxos de superfície, instabilidade do solo para fins de fundação, vazamento de reservatórios de superfície e ambientes de eliminação de resíduos insatisfatórios (LEGRAND, 1983).

Travassos (2010), afirma que em ambientes cársticos o solo é representado como a porção superior da zona não saturada, onde a água precipitada pode, dependendo da profundidade e propriedades hidrológicas, ser armazenada temporariamente ou infiltrar em direção à zona epicarste. Sendo assim o solo pode funcionar como um regulador temporal de recarga hídrica no sistema cárstico.

A formação de solos de Latossolo Vermelho distroférico típico (Terra Rossa) no carste da Península de Yucatán, onde o autor refere que a fonte do material que constitui solos de silicato sobre calcário foi debatida por mais de 150 anos. As duas principais fontes são a origem autoctone e outra aloctone, sendo definidos quatro tipos de estudos para determinar a origem dos materiais: Estudos regionais com trabalho de campo intensivo, descrição de perfis de solo e

relevos; Estudos de campo com trabalho de campo intensivo, mas restritos espacialmente; Estudos de caso (pontos ou pequenas áreas) incluindo análises geoquímicas e micromorfológicas. Os dois primeiros tipos de estudo adotaram a hipótese de origem de solo residual, no qual a sua formação se deu através da dissolução de calcário, enquanto o terceiro tipo adotou a hipótese da contribuição de materiais alóctones. Na discussão dos resultados o autor deixa claro que há contribuição tanto alóctone quanto autóctone (BAUTISTA et al., 2011).

Sedov et al. (2007), e Cabadas-Báez et al. (2010), descrevem a cobertura do solo da península de Yucatán, composta por Chernossolos Rêndzicos e Neossolos razos ricos em húmus (os autores não entram no mérito da discussão sobre a acumulação de matéria orgânica, mas uma hipótese para este tipo de ambiente, seria a concentração de materiais em dolinas), pedregosos, definidos de acordo com sua morfologia seguindo os critérios da World Reference Base (WRB, 1998). Sedov et al. (2007) afirma que a associação mais comum para a área é de Neossolos Rêndzicos, Neossolos calcáricos e Neossolos litólicos, e atribui diferenças nestas associações às mudanças na composição do relevo e calcário, de forma que as áreas com menor desenvolvimento do solo apresentam Neossolos Litólicos e Neossolos Rendzinicos. A saturação em água leva a formação de Leptossolos Gleicos.

Apenas dois casos de materiais alóctones foram detectados nos solos cársticos. Para Sedov et al. (2008), Leptosolos são essencialmente produtos de degradação do solo, podendo resultar também de misturas de materiais alóctones com autóctones.

A hematita, assim como outros óxidos de ferro, tem papel fundamental na estruturação e agregação dos solos, ajudando de forma direta na infiltração e promovendo uma maior coesão entre os grãos, de forma que a erosão é dificultada no meio (CORREA et al., 2008). Estes óxidos também servem de parâmetros para datação de solos através do paleomagnetismo, como foi realizado por Jaqueto et al. (2016), que fez medições através do magnetismo remanescente para datação de solos e sedimentos na região de Pau d'Alho, MT.

Solos Tropicais em áreas cársticas brasileiras

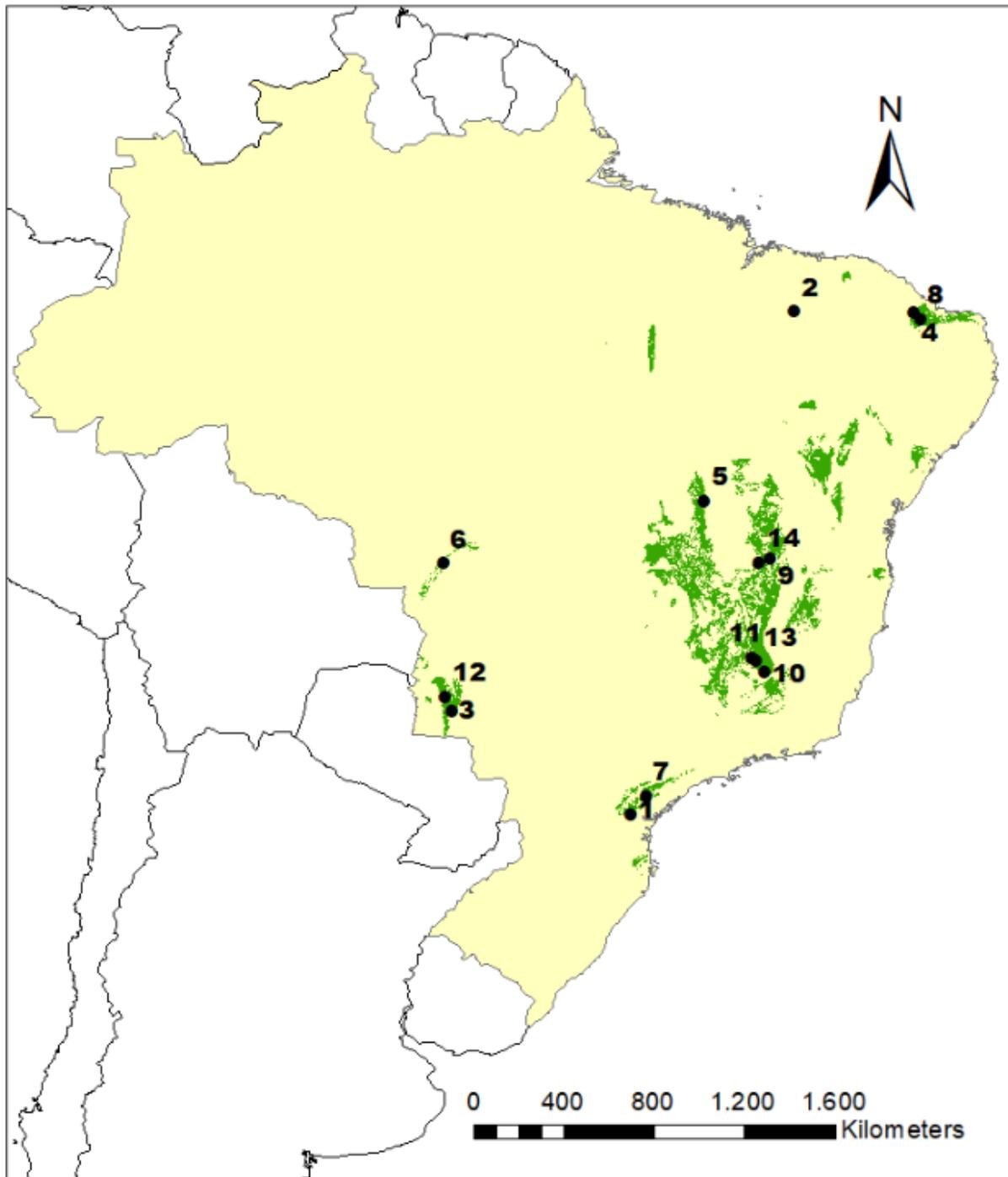
No Brasil, existem poucos estudos de solos em áreas cársticas e os dados hidrológicos destes solos não são suficientes para que se obtenha uma classificação diagnóstica do território. Os poucos trabalhos realizados foram ordenados no mapa da Figura 8.

Shinzato (1998) (Figura 8, ponto 11), Oliveira et al. (1998) (Figura 8, ponto 9), Mota et al. (2008), Girão et al. (2014), e Ferreira et al. (2016) afirmaram que as pesquisas sobre solos em áreas

cársticas em climas tropicais ainda são incipientes. Tem sido observado que o processo de carstificação nos trópicos é mais intenso do que nas regiões temperadas devido às condições de temperatura mais elevadas e abundância de precipitação (KARMANN, 2000) (Figura 8, ponto 6).

Piló (1998), desenvolveu uma pesquisa em Lagoa Santa - MG, e foram identificadas feições cársticas em rochas carbonáticas da Formação Carmo do Rio Claro (Grupo Andrelândia), Formações Gandarela (Grupo Itabira) e Fecho do Funil (Grupo Piracicaba), Formação Barroso (Grupo São João del Rei), Formação Vazante, Formação Uberaba (Grupo Bauru) e Formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré (Grupo Bambuí). Embasado em dados de campos e em outras pesquisas, o autor afirma que para o desenvolvimento de 1m de solo em um carste tropical úmido, são necessários de 250.000 a 850.000 anos, e segundo Piló são necessários 5m de rocha carbonática inalterada para a formação de 30 cm de solo, sendo que o tempo médio para o desenvolvimento do perfil fica entre 50 e 100 mil anos (Figura 8, ponto 10). Outro dado importante levantado pela pesquisa de Piló é que, para cada metro cúbico de argila produzida por descalcificação, são necessários 80m³ de calcário.

Pesquisas em Áreas Cársticas do Brasil



Legenda

- | | | | |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| ● Formações Cársticas | ● 4 - Ferreira et al, 2012 | ● 8 - Maniçoba et al, 2016 | ● 12 - Silva et al, 2013 |
| ● 1 - Araújo, 2016 | ● 5 - Ferreira et al, 2017 | ● 9 - Oliveira et al, 1998 | ● 13 - Travassos, 2010 |
| ● 2 - Barradas et al, 2014 | ● 6 - Jaqueto et al, 2016 | ● 10 - Piló, 1998 | ● 14 - Vasconcelos et al, 2013 |
| ● 3 - Dias, 2000 | ● 7 - Karmann et al, 2004 | ● 11 - Shinzato, 1998 | |

Figura 8. Mapa de pesquisas de solos em áreas cársticas, com a localização das rochas Calcíticas e Dolomíticas. Fonte: Produzido pelo autor com a base de dados do CPRM (1997).

No trabalho de Costa et al. (2015), foi feita uma compilação de dados de solo na África Ocidental tropical a partir de documentos bibliográficos incluindo teses, relatórios, artigos e mapas relacionados a levantamentos de solo em cada país da área estudada. O autor se embasou em dados de campo, metodologias de classificação e datação para diagnosticar os solos tropicais. A conclusão foi que o desenvolvimento do solo na África Ocidental inclui o intemperismo progressivo, a iluviação de argila, a segregação de ferro, o acúmulo de oxihidróxidos de ferro e alumínio, o endurecimento (“indurated”) e o aumento da espessura do solo com o tempo. E, normalmente algumas características de solos maduros desenvolvidos em áreas tropicais podem não estar relacionadas com o saprolito subjacente, mas sim derivarem de um material parental diferente que desapareceu ao longo do tempo geológico (COSTA et al., 2015).

Os solos em áreas cársticas normalmente são bem drenados, podendo conter cascalho e calcário, argila e marga como os descritos por Hu et al. (2015). O autor explica que o solo em áreas cárstica no sudeste da china, apresentam taxa de infiltração estável variando 0,43 a 4,25 mm/min; o teor de matéria orgânica do solo é relativamente alto, variando de 2,2% a 10,1%, e podem apresentar cristais de calcita neoformados, concreções ferruginosas, com horizontes silte arenoso, e estrutura de blocos subangulares, finos e friáveis que se quebram em grânulos, estrutura granular bem desenvolvida, com bioturbação, como os solos estudados por Cabadas-Báez et al. (2010). Sendo assim, conclui-se que não existe um padrão composicional, mas é possível determinar similaridades devido ao material de origem e clima, que são os únicos fatores com características semelhantes, que podem fornecer uma base de partida para classificação dos solos desenvolvidos em carstes tropicais.

No trabalho de Maranhão et al. (2016), foi verificado que, no sudoeste do Tocantins (Figura 8, Ponto 8), a variação do solo, principalmente com a relação à profundidade, foi determinada pela topografia, porém o material de origem proveniente de rochas do grupo Bambuí, teve papel secundário no que diz respeito a morfologia, textura e outras propriedades químicas do solo, pois todos os perfis investigados apresentaram alto teor de silte e argila. O alto teor de Ca e Mg, alto pH e baixo teor de Al são representativos para solos desenvolvidos sobre rochas carbonáticas. A saturação por bases e o equivalente de carbonato de cálcio também foram elevados.

Mas segundo Shinzato (1998), solos desenvolvidos sob a influência de rochas calcárias apresentam algumas características que podem distingui-los parcialmente de outros perfis (Figura 8, Ponto 11). Os solos seriam rasos e, raras vezes, profundos ou muito profundos, sendo eutróficos (com saturação de bases superior a 50%), possuindo argila de atividade alta, isto é, capacidade de troca catiônica superior a 27 cmolc kg⁻¹ de argila e possuem razões elevadas de SiO₂/Al₂O₃, normalmente superiores a 2,5.

Tem sido um consenso científico que em áreas cársticas, os processos de transporte podem contribuir mais para pedogênese que o material de origem. Tal processo é relatado por Bautista et al. (2011), que realizou mapeamento em escala de detalhes de solos em áreas cársticas na península de Yucatán, e também por Olson et al (1980), que em seu trabalho buscou estabelecer fatores prevaletentes na formação de Terra Rossa sobre rochas calcárias no Sul da Índia.

Segundo Silva et al. (2013) no Brasil, apesar de os sistemas cársticos representarem uma área significativa do território nacional (cerca de 6 %), ainda carecem de estudos, sobretudo no que refere-se à sua cobertura pedológica. Os dados de solos são insuficientes para classificações bibliográficas, devendo ter apoio de dados de campo para que uma pesquisa de pedogênese em áreas cársticas seja adequadamente embasada.

O mapeamento de horizontes cálcicos e petrocálcicos é uma importante ferramenta que pode auxiliar na identificação e caracterização de solos em áreas cársticas, já que a lixiviação dos carbonatos em horizontes superficiais e, posteriormente sua percolação e reprecipitação em camadas subjacentes é comum nestes ambientes (SILVA et al., 2013) (Figura 8, ponto 13). Estes horizontes foram descritos por Mack et al. (1994), sendo utilizados como diagnósticos de paleoclimas como também paleoambientes. No caso do Brasil o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, EMBRAPA, 2018), descreve o horizonte cálcico como “apresentando uma espessura de 15 cm ou mais, é enriquecido com carbonato de cálcio secundário e contém 150 g kg⁻¹ ou mais de carbonato de cálcio equivalente, tendo no mínimo 50 g kg⁻¹ a mais de carbonato que o horizonte ou camada subjacente. Este último requisito é expresso em volume, se o carbonato secundário do horizonte cálcico ocorre como pendentes em cascalhos, como concreções ou na forma pulverulenta. Se tal horizonte cálcico está sobre mármore, marga ou outros materiais altamente calcíticos (400 g kg⁻¹ ou mais de carbonato de

cálcio equivalente), a percentagem de carbonatos não necessita decrescer em profundidade”.

O SiBCS, 2018, afirma que com o enriquecimento em carbonatos, o horizonte cálcico tende progressivamente a se tornar obturado com carbonatos e, cimentado, formando um horizonte contínuo, endurecido, maciço, que passa a ser reconhecido como horizonte petrocálcico. “Nos estágios iniciais do horizonte cálcico, este tem carbonatos de consistência macia e disseminados na matriz do solo, ou acumulados em concreções endurecidas ou ambos. O horizonte petrocálcico evidencia o avanço evolutivo do processo de calcificação” (SiBCS, EMBRAPA, 2018). Pode haver ainda a presença acessória de sílica, é muito rígido quando seco, com estruturação laminar e poros totalmente obstruídos, apresentando espessura mínima superior a 10 cm, exceto no caso de horizonte laminar sobre rocha consolidada.

Para Silva et al. (2013), as pedoformas côncavas proporcionam maior desenvolvimento pedogenético em razão da maior infiltração da água no solo, já nas superfícies convexas predominam solos menos evoluídos, em razão da intensificação do processo erosivo (Figura 8, ponto 12). A coexistência de concreções ferromangnosas com pontuações de carbonato de cálcio foram correlacionados pelos autores à clima atual mais seco, responsável pela preservação do CaCO₃ no solo. Em toposequência da base para o topo foram mapeados Argissolos Vermelhos eutróficos (nitossólico), Argissolos vermelhos distróficos, e Cambissolo háplico.

Ferreira et al. (2016), estudaram a gênese de solos de ambiente cárstico na Chapada do Apodi em busca de horizontes cálcicos ou petrocálcicos, tentando identificar os fatores de formação que podem levar a formação de solos com estes horizontes. Os autores buscaram identificar os diferentes minerais presentes no solo e, como os processos de intempéries agiram sobre o material de origem na evolução pedogenética (Figura 8, ponto 5). No trabalho De Ferreira et al. (2016), para validação da pesquisa os autores se valeram de diversos testes para cálculos de percentagens químicas, entre eles o equivalente de carbonato de cálcio através do ataque com HCL. Outro dado importante do trabalho é a análise espectroscópica, na qual foi obtida a faixa UV-visível entre 465 e 665 nm de absorbância do solo. Com auxílio da difratometria de raios X foi possível caracterizar as frações granulométricas para os perfis analisados.

Ferreira et al. (2016) chegaram à conclusão que alguns perfis receberam contribuição de materiais coluvionares, enquanto que outros estão

associados a ciclos de pedogênese/morfogênese com combinação de clima de semiaridez. A eluviação de argilas foi outro processo atuante no processo pedogenético. Resultados semelhantes aos do trabalho de Silva et al. (2017), demonstrando a que a contribuição do material parental tem forte influência no desenvolvimento pedológico, apesar de o relevo ser determinante. Alguns trabalhos no Brasil têm feito um levantamento de dados em áreas cársticas como Dias (2000) (Figura 8, ponto 3), e Cruz et al (2005) que mesmo não tendo como foco principal o estudo pedogenético, trazem alguns dados de solo como subproduto.

A ocupação do solo em áreas cársticas também tem sido objeto de estudo devido ao risco de colapso nestas áreas, de forma que a geotecnia tem trazido contribuições importantes para o entendimento do comportamento do solo em regiões de rochas carbonáticas. O trabalho de Araújo (2006) (Figura 8, ponto 1), e Barradas et al. (2014) tentaram fazer uma avaliação e mapeamento de colapsos e subsidências de solos em áreas cársticas, no entanto não avaliaram condições de pedogênese e mineralogia que poderiam fornecer uma base importante para este tipo de processo, pois o entendimento das micro estruturas dos solos fornece suporte para estimativas da evolução na frente de intemperismo, fator principal que leva ao colapso de cavernas e conseqüentemente dos materiais de cobertura subjacentes.

Portanto para Vestena et al. (2002), e Travassos (2010) (Figura 8, ponto 13) a atividade antrópica pode acelerar a erosão aumentando a susceptibilidade de solo e rocha em área cárstica, mas o uso e ocupação destas áreas não é descartado. Um uso racional dos recursos e potencialidades pode ser viável desde que seja planejado de forma a minimizar os impactos. Pois além da erosão e colapso, estas áreas são muito sensíveis a atividades agrícolas, aterros sanitários, atividades turísticas, extração de água subterrânea, mineração, ocupação urbana, dentre outras.

A determinação do parâmetro potencial erosivo do solo permite fazer previsões da quantidade de perda de solo por escoamento superficial. Em um modelo para recuperação ou preservação de uma área esta estimativa é de extrema importância para se adotar medidas eficientes que evitem a perda de solo, e principalmente para áreas cársticas que são muito mais susceptíveis a erosão. No trabalho de Ferreira e Morais (2017) (Figura 8, ponto 5), foi feito um cruzamento de informações de geologia,

geomorfologia, pedologia, declividade, uso e ocupação da terra para definir o potencial erosivo na bacia do córrego Cana-Brava, TO, para fins de conservação do ambiente cárstico. Nesse trabalho foi realizada uma análise multicriterial levando em consideração os fatores citados anteriormente, e foram definidas quatro classes de áreas de acordo com o potencial erosivo, sendo Classe 1 para o mais baixo e 4 para o mais alto, verificando que o carste descoberto e o carste em exumação apresentam potencial erosivo moderadamente alto.

Os ambientes cársticos também são palcos de estudos paleontológicos, arqueológicos e antropológicos, pois as estruturas com grandes profundidades servem como depósitos de fosséis. Animais podem facilmente se acidentar nestas estruturas e serem soterrados rapidamente, além disso o ambiente de deposição deste tipo de rocha pode abrigar muitas espécies marinhas. Cavernas também foram utilizadas como abrigo por humanos ao longo do desenvolvimento das civilizações, guardando registros arqueológicos que ajudam a remontar a história da Terra e a história humana. Nesse sentido Vasconcelos et al. (2013), estudou Antropossolos em áreas cársticas, que devido aos restos e refugos de alimentos (e.g. ossos, vísceras, espinhas de peixes), excrementos humanos e de animais, cinzas de lenha queimada em fogueira, restos de cerâmicas e artefatos líticos, apresentam estruturas químicas e físicas muito diferente dos padrões naturais, mas as características químicas mais evidentes são os elevados teores de fosfato. A descontinuidade das cores observada em trincheiras de estudo de Vasconcelos et al. (2013) também indicam inexistência de relação pedogenética entre os horizontes investigado (Figura 8, ponto 14).

Considerações Finais

Os trabalhos já realizados sobre a pedogênese cársticas deixam claro a complexidade destes sistemas, e ao tentar enquadrar solos desenvolvidos nestas áreas aos grupos hidrológicos de solos verifica-se uma lacuna de informações muito grande neste objeto de estudo. Observando as pesquisas em áreas cársticas, pode-se afirmar que estes ambientes não estabelecem um padrão de relevo clássico, porém a composição do material de origem apresentam semelhanças passíveis de comparação, sem se levar em consideração o material alóctone subjacente, que normalmente participa da composição pedogenética com a maior porcentagem do sedimento transportado para a área. Ao tentar enquadrar os solos cársticos tropicais aos grupos existentes, previamente deve

fazer tradagens para que seus dados façam parte destes estudos, assim como trincheiras ou poços, associados a outras análises químicas e físicas dos solos para que a classificação não seja especulativa.

O desenvolvimento pedogenético em carste não obedece às clássicas topossequências, devido às rápidas variações que podem ocorrer nestes terrenos, sendo assim as contribuições coluvionares e aluvionares podem ser interrompidas ou retomadas rapidamente. Colapsos, abatimento ou subsidências fazem parte do ciclo cárstico, e as mudanças geomórfica nestas áreas ocorrem em um período muito mais curto que nas paisagens clássicas, nas quais foram definidas leis entre a interação física e química entre a água e o solo.

Metodologias clássicas como ensaios hidrológicos de campo também não devem ser utilizados como única ferramenta diagnóstica, já que se não existir um horizonte cálcico ou petrocálcico. A água deverá infiltrar totalmente, sem que se possa alcançar o ponto de saturação para medir a velocidade da infiltração.

Embora as afirmativas anteriores sejam conclusivas, alguns perfis de solos em áreas de rochas carbonáticas, podem se desenvolver semelhante aos sistemas clássicos conhecidos, antes que ocorra o desenvolvimento de carste subterrâneo ou externo. Com o desenvolvimento do sistema cárstico, a água poderá passar muito rápido pelo sistema, cessando ou diminuindo a velocidade do desenvolvimento pedogenético. A velocidade com que a água passa por este sistema pode desencadear perda de vegetação natural ao ponto que o solo exposto se enfraqueça e provoque a desertificação cárstica.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UNB (Universidade de Brasília) que forneceu uma estrutura adequada para a realização da pesquisa, além da Capes, ICMBIO e CECAV, que tem trabalhado em parceria com os autores via Laboratório de Geografia Física da UNB, para a realização de diversos trabalhos.

Referências

- ARAÚJO, M. L. M. A influência do aquífero carste em Almirante Tamandaré. **Revista Eletrônica Geografar**, v. 1, n. 1, p. 20–37, 2006.
- BADÍA, D.; MARTÍ C. Plant ash and heat intensity effects on chemical and physical properties of two contrasting soils. **Arid Land Res Manage** 17:23–41. 2003.
- BARRADAS, M. T.; GOMES, E.; CARVALHO, A.; VIEIRA, C. I. Mapeamento Dos Colapsos E Subsidiências Do Solo, Em. n. 1, 2014.
- BRADY, N. C. The Nature and Properties of Soils. 9th Edition. Macmillan Publishing Company. New York. 1984.
- BAUTISTA, F.; PALACIO-APONTE, G.; QUINTANA, P. ZINCK J. A. Spatial Distribution And Development Of Soils In Tropical Karst Areas From The Peninsula Of Yucatan, Mexico. **Geomorphology**, v. 135, n. 3–4, p. 308–321, 2011.
- BOERO, V.; PREMOLI, A.; MELIS, P.; BARBERIS, E.; ARDUINO, E. Influence of climate on the iron oxide mineralogy of terra rossa. **Clays Minerals**, v. 40, n. 1, p. 8–13, 1992.
- CABADAS, H.; SOLLEIRO, E.; SEDOV, S.; PUIG, T.; GAMA-CASTRO, J. 2010. Pedosediments of karstic sinkholes in the eolianites of NE Yucatán: a record of Late Quaternary soil development, geomorphic processes and landscape stability. **Geomorphology** 122, 323–337.
- CHALCRAFT, D.; PYE, K. Humid tropical weathering of quartzite in Southeastern Venezuela. **Zeitschrift für Geomorphologie**. Berlin: v. 28, n. 3, p. 321-332, Set. 1984.
- CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; BARRÓN, V.; FONTES, M. P.F.; TORRENT, J.; CURI, N. Caracterização de óxidos de ferro de solos do ambiente tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1017-1031, 2008.
- CRUZ, F. W. et al. Influence of hydrological and climatic parameters on spatial-temporal variability of fluorescence intensity and DOC of karst percolation waters in the Santana Cave System, Southeastern Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 302, n. 1–4, p. 1–12, 2005.
- DA COSTA, P.Y.D.; NGUETNKAM, J.-P.; MVOUBOU, C.M.; TOGBÉ, K.A.; ETTIEN, J.-B. & YAOKOUAME, A. Old Landscapes, pre-weathered materials, and pedogenesis in tropical Africa: How can the time factor of soil formation be assessed in these regions? **Quaternary International**, 376, 47-74. 2015.
- DIAS, J. A região cárstica de Bonito, MS: uma proposta de zoneamento geoecológico a partir de unidades de paisagem. **Ciência Geográfica**. Bauru: [s.n.], n. 1, jan./abr. 2000.
- DOERR, S. H. Karst-like landforms and Hydrology in Quartzites of the Venezuelan Guyana Shield: Pseudokarst or "Real" Karst? **Zeitschrift für Geomorphologie**. Berlin: v. 43, n. 1, p. 1-17. (1999)
- EMBRAPA (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA; SOLOS, E.; MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, P. E A. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: [s.n.]
- FERREIRA, T. O. Soil genesis and iron nodules in a karst environment of the Apodi Plateau. **Revista Ciência Agronômica**, 45(4), 683–695. (2014). <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000400006>
- FERREIRA, E. P.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; VALLADARES, G. S.; SILVA R. C.; AZEVEDO, A. C. Genesis and classification of soils containing carbonate on the apodi plateau, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1–20, 2016.
- FERREIRA, Z. A.; MORAIS, F. “Physical diagnostic-conservationist of karstic environment of watershed Cana-brava river, Aurora do Tocantins (TO, Brasil).” Diagnostico físico-conservacionista do ambiente cárstico da bacia do córrego Cana-brava, Aurora do Tocantins (TO, Brasil). 28(52): 244–73. 2018.
- FOTH, H. D.; SCHAFER, J. W. 1980. Soil geography and land use.
- FORD, D.C.; WILLIAMS, P.W. (1989) Karst Geomorphology and Hydrology, Unwin Hyman, London.
- GIRÃO, R. DE O.; MOREIRA, L. J. DA S.; GIRÃO, A. L. DE A., ROMERO, R. E.; FERREIRA, T. O. Soil Genesis And Iron Nodules In A Karst Environment Of The Apodi Plateau. Centro de Ciências Agrárias - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 4, p. 683-695, out-dez, 2014.

- GLEICK, P. H, Recursos de água. Na Enciclopédia do Clima e Tempo, ed. Por Superlogo H. Schneider, Oxford University Press, Nova Iorque, vol. 2, pág. 817-823. 1996. In < water.usgs.gov/edu/watercycleportuguese.html>, acesso 4 de abril de 2018.
- HU, K.; CHEN, H., NIE, Y., & WANG, K. Seasonal recharge and mean residence times of soil and epikarst water in a small karst catchment of southwest China. *Scientific Reports*, 5(May), 1–12. <https://doi.org/10.1038/srep10215> (2015).
- IUSS Working Group WRB, 2006. World Reference Base for Soil Resources 2006. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome. 128 p.
- IMESON, A.C.; VERSTRATEN, J.M.; MULLIGEN, E.J.; SEVINK, J. The effects of fire and water repellence on infiltration and runoff under Mediterranean type forest. *Catena* 19:345–361. 1992.
- JAQUETO, P., TRINDADE, R. I. F., HARTMANN, G. A., NOVELLO, V. F., CRUZ, F. W., KARMANN, I., FEINBERG, J. M. (2016). Linking speleothem and soil magnetism in the Pau d'Alho cave (central South America). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(10), 7024–7039. DOI: 10.1002/2016JB013541.
- JONES, W. K.; HOBBS, H. H. III; WICKS, C. M.; CURRIE, R. R.; HOSE, L. D.; KERBO, R. C.; GOODBAR, J. R. TROUT, J. Recommendations and guidelines for managing caves on protected lands. Charles Town: **Karst Waters Institute**. (2003)
- KARMANN I.; TEIXEIRA W.; TOLEDO M. C. M.; FAIRCHILD T. R.; TAIOLI F. Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. In: **Decifrando a terra**. São Paulo: Oficina de textos; 2000. LEPSCH, Igor F. 19 Lições de Pedologia. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- LEGRAND, H. E. Perspective on Karst Hydrology. *Journal of Hydrology*. 1983 Vol 61; pag 343—355.
- LYNCH, L.S. Gênese e geoquímica de solos em ambiente cárstico no cerrado da região de Planaltina de Goiás. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2009. 167p. (Tese de Doutorado)
- MACK, G.H.; COLE, D.R.; CALVIN JAMES, W.; GIORDANO, T.H. & SALYARDS, S.L. Stable oxygen and carbon isotopes of pedogenic carbonate as indicators of PlioPleistocene paleoclimate in the Southern Rio Grande rift, South-Central New Mexico. *Am. J. Sci.*, 294:621-640, 1994.
- MANIÇOBA, F. E., FILHO, F. G., MALALA, C., NAIRONY, R., CARLA, A. (2016). Mineralogia de solos calcários da Chapada do Apodi, Oeste Potiguar (1), (1), 1–4.
- MARANHÃO, D. D. C.; PEREIRA, M. G.; COLLIER, L. S.; ANJOS, L. H. C. AZEVEDO, A. C.; CAVASSANI, R. S. Genesis and classification of soils containing carbonates in a toposequence of the Bambuí Group. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1–17, 2016.
- MATAIX-SOLERA, J.; DOERR, S. H. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire-affected pine forests in southeastern Spain. **Geoderma** 118:77–88. 2004.
- MOTA, J. C. A.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; FILHO, J. A.; LIBARDI P. L. Algumas propriedades físicas e hídricas de três solos na Chapada do Apodi, RN, cultivados com melão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 49–58, 2008.
- MUSGRAVE, G.W. 1955. How much of the rain enters the soil? In *Water: U.S. Department of Agriculture. Yearbook*. Washington, DC. pp. 151–159.
- NEH 654, USDA-NRCS, August, 2013. Part 630, National Engineering Handbook, "Hydrologic Soil Groups."
- OLIVEIRA, C.V.; KER, J.C.; FONTES, L.E.F.; CURI, N. & PINHEIRO, J.C. Química e mineralogia de solos derivados de rochas do Grupo Bambuí no Norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22:583-593, 1998.
- OLSON, C. G., RUHE, R. V, & MAUSBACH, M. J. (1980). The {Terra Rossa} limestone contact phenomena in karst, southern {Indiana}. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44(5), 1075–1079.
- PILÓ, L. B.; CASTRO, S. S. Morfologia cárstica e materiais constituintes: dinâmica e evolução da depressão poligonal macacos-baú - carste de Lagoa Santa, MG. 1998. **Universidade de São Paulo**, São Paulo, 1998.

PILÓ, L. B.; AULER, A. Introdução à Espeleologia. In: CECAV. III **Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília: CECAV/ Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2011. Cap. 1, p. 7-23.

ROBICHAUD, P. R. Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountain forests, USA. **J Hydrol** V. 231, Pág: 220–229. 2000.

SEDOV, S., SOLLEIRO, R.E., FEDICK, S.L., GAMA, C.J., PALACIOS, M.S., VALLEJO, G.E., 2007. Soil genesis in relation to landscape evolution and ancient sustainable land use in the northeastern Yucatan Peninsula, Mexico. **Atti Soc. Tosc. Sci. Nat. Mem.** 115–126.

SEDOV, S., SOLLEIRO, R.E., FEDICK, S.L., PI, P.T., VALLEJO, G.E., FLORES, D.M.L., 2008. Micromorphology of a soil catena in Yucatán: pedogenesis and geomorphological processes in a tropical karst landscape. In: Kapur, S., Mermut, A., Stoops, G. (Eds.), *New Trends in Soil Micromorphology*. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, pp. 19–37.(BOOKS.google).

SCHWERTMANN, U. & TAYLOR, R.M. Iron oxides. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. *Minerals in soil environments*. Madison, Soil Science Society of America, 1989. p.379-438.

SHINZATO, E. **Campos dos goytacazes - rj dezembro - 1998**. [s.l.] UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF, 1998.XSILVA, M. B., DOS ANJOS, L. H. C., PEREIRA, M. G., SCHIAVO, J. A., COOPER, M., & CAVASSANI, R. DE S. (2013). Gênese e classificação dos solos de uma topossequência em área de carste na serra da Bodoquena, MS. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1464–1480, 2013.

SILVA, M. B; ANJOS, L. H. C. dos; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; COOPER, M.; CAVASSANI, R. S. Soils in the karst landscape of Bodoquena plateau in cerrado region of Brazil. *Catena*, Amsterdam, Elsevier BV, v. 154, p. 107-117, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.02.022>> DOI: 10.1016/j.catena.2017.02.022.

TÁRNÍK, A.; LEITMANOVÁ, M. Analysis of the Development of Available Soil Water Storage in the Nitra River Catchment. **IOP Conference**

Series: Materials Science and Engineering, v. 245, n. 6, 2017.

THOMAZ, E. L. Interaction between ash and soil microaggregates reduces runoff and soil loss. **Science of the Total Environment**, v. 625, p. 1257–1263, 2018.

TOOHEY, R. C. BOLL, J.; BROOKS, E.S.; JONES, J. R. Effects of land use on soil properties and hydrological processes at the point, plot, and catchment scale in volcanic soils near Turrialba, Costa Rica. **Geoderma**, v. 315, n. March 2017, p. 138–148, 2018.

TRAVASSOS, L. E. P. **Considerações sobre o carste da região de Cordisburgo, Minas Gerais, Brasil**. Belo Horizonte; Tradição Planalto, 2010.

VASCONCELOS, B. N. F.; KER, J. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; POIRIER, A. P. P.; ANDRADE, F. V. Antropossolos em sítios arqueológicos de ambiente cárstico no norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 986-996, Aug. 2013. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832013000400016&lng=en&nrm=iso>. access on 18 June 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000400016>.

VESTENA, L. R.; KOBİYAMA, M.; SANTOS, L. J. C. Considerações Sobre Gestão Ambiental em Áreas Carste. **Raega**, v. 4, n. 6, p. 81–94, 2002.

YOUNG, R. W. Tower Karst in Sandstone: Bungle Bungle massif, northwestern Australia. **Zeitschrift für Geomorphologie**. Berlin – Stuttgart, 30 (2): 189-202. (1986)

YOUNG, I.M.,CRAWFORD,J.W., Interaction sand self-organization in the soil- microbe complex. **Science** 304,1634–1637. 2004.

WHITE, W.B. 1988. *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. New York, Oxford University Press, 464 pp.

WILLEMS, L.; COMPÈRE, P.; HATERT, F.; POUCKET, A.; VICAT, J. P.; EK, C.; BOULVAIN, F. Karst in granitic rocks, south Cameroon: Cave genesis and silica and taranakite speleothems. *Terra Nova*, Oxford, n. 14, p. 355-362. (2002)

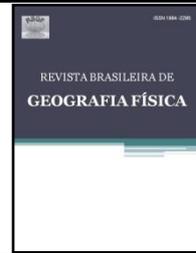
USGS, Science for changing world, The Water Cycle, Disponível em:

<<https://water.usgs.gov/edu/watercycleportuguese.html>> Acesso em: 10 de Abril de 2018.

ZHANG, L.; NAN, Z.; YU, W.; ZHAO, Y.; XU, Y. Comparison of baseline period choices for separating climate and land use/land cover change impacts on watershed hydrology using distributed hydrological models. **Science of the Total Environment**, v. 622–623, n. May, p. 1016–1028, 2018.



Revista Brasileira de Geografia Física



Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Análise da eficiência dos métodos indiretos para o mapeamento de solos frente às técnicas diretas, e suas possíveis associações: Uma revisão metodológica

José Gustavo da Silva Nunes¹, Rogério Uagoda²,

¹ Mr. em Análise de Sistemas Naturais pelo programa de Pós-Graduação em Geografia (UnB), Bacharelado e Licenciatura em Geografia (UnB), Geologia (UnB). Departamento de Geografia, Universidade de Brasília Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília, Distrito Federal. CEP: 70910-900. Brasil. (61) 31077257. jgustavosn@gmail.com ² Dr. Pesquisador, Departamento de Geografia, Universidade de Brasília Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília, Distrito Federal. CEP: 70910-900. Brasil. (61) 31077257. rogeriouagoda@unb.br

Artigo recebido em 24/09/2019 e aceito em 21/03/2020

RESUMO

Este artigo é uma revisão das metodologias indiretas de mapeamento pedológico, que incluiu o SIG e sensoriamento remoto dentro do mapeamento digital de solos, a espectrorradiometria e Georadar (GPR), comparados à análise da paisagem. Pesquisas tem demonstrados que o mapeamento digital de solos (MDS) é uma ferramenta eficiente desde o início do ano 2000, associadas a outros métodos como o sensoriamento remoto e análises laboratoriais, o MDS forneceu ao mundo mapas que representam bem a realidade dos solos. Mas as técnicas diretas ainda são usuais e eficientes, e podem ser associadas aos métodos indiretos, para que informações locais de mapeamento possam ser dispersadas regionalmente. A busca por técnicas de baixo custo, eficiência e praticidade tem levado pesquisadores a optarem por métodos como o Georadar para verificar a profundidade do solo, sem que seja necessário a destruição de perfis por meio da abertura de trincheiras, como também ao uso de imagens de radar que disponibilizam um produto de alta resolução espacial, independentemente da altitude da plataforma, e que tem auxiliado na extração de diversas informações da paisagem diretamente ligadas à pedogênese. A espectrorradiometria é uma metodologia que trabalha com mensuração da energia eletromagnética radiante, e permite fazer associações rápidas entre alvos e curvas espectrais, permitindo a criação de bibliotecas globais destas curvas. A radiometria por sua vez tem sido amplamente utilizada em sistemas que operam na faixa de frequência de micro-ondas, que variam entre 1mm à 1m de comprimento, e permitem localizar objetos. Esta pesquisa tem o intuito de buscar a evolução do mapeamento pedológico através das diversas técnicas citadas, e bem como a associação entre os diversos métodos para gerar um mapa de solos de alta precisão.

Palavras Chaves: Mapeamento de Solo; GPR; Espectrorradiometria; Sensores Orbitais.

Efficiency analysis of indirect methods for soil mapping against direct techniques, and their possible associations: A methodological review

ABSTRACT

This article is a review of indirect methodologies for pedological mapping, which included GIS and remote sensing within digital soil mapping, spectroradiometry and Georadar (GPR), compared to landscape analysis. Research has shown that digital soil mapping (MDS) has been an efficient tool since the beginning of the year 2000, combined with other methods such as remote sensing and laboratory analysis, MDS has provided the world with maps that represent the reality of soils well. But direct techniques are still common and efficient, and can be associated with indirect methods, so that local mapping information can be dispersed regionally. The search for low-cost, efficient and practical techniques has led researchers to look for techniques such as Georadar to check the depth of the soil, without the need to destroy profiles by opening trenches, as well as using radar images. which provide a high spatial resolution product, regardless of the platform's altitude, and which has helped in the extraction of various landscape information directly linked to pedogenesis. Spectroradiometry is a methodology that works with the measurement of radiant electromagnetic energy, and allows for quick associations between targets and spectral curves, allowing the creation of global libraries of these curves. Radiometry in turn has been widely used in systems that operate in the microwave frequency range, ranging from 1mm to 1m in length, and allow you to locate objects. This research aims to seek the evolution of pedological mapping through the various techniques mentioned, as well as the association between the various methods to generate a highly accurate soil map.

Keywords: Soil Mapping; GPR; Spectroradiometry; Orbital Sensors.

Introdução

O mapeamento de solos é uma das primeiras fases para uso, manejo e preservação de uma área ambiental. Não há como falar em mapeamento sem antes passar por estudos de pedometria, termo criado por Alex McBratney da Universidade de Sydney para descrever o estudo quantitativo da variação do solo. O mapeamento tradicional, envolvendo coletas de campo, tradagens, pedometria em trincheiras ainda hoje é usual, sendo a mais importante fonte de classificação do solo, além da confirmação de informações referentes a pedologia. Mas devido a importância da preservação, o uso de técnicas indiretas tem avançado no sentido de dar mais agilidade neste processo, sem a necessidade de destruir parcialmente os perfis ou horizontes diagnósticos do solo. Embora a informação correta e precisa acerca do solo constitua um desafio, devido à divergência de termos, desatualização, generalização e imprecisão dos métodos (Sanchez, 2009).

O solo é produto da ação concomitante do clima e de organismos que atuam desgastando material de origem (rocha), que dependendo do tipo de relevo poderá intensificar ou retardar o processo. Todos estes fatores devem ter uma continuidade ao longo do tempo para desenvolver um perfil do solo. Durante sua formação, o solo poderá passar por processos de desenvolvimento como perdas, transformações, translocações e adições. Sendo assim estes sistemas ambientais estão entre os mais complexos devido a diversidade de processos e interações envolvidos em sua formação. Por se tratar de um sistema aberto com contínuo fluxo de massa dentro e fora do sistema em diversas fases (líquido, gasoso e sólido), estes sistemas são muito sensíveis às interferências antrópicas, devido ao seu manejo e uso (Young e Crawford, 2004). E atualmente, pesquisas consideráveis sobre o solo são realizadas fora do domínio imediato dos departamentos e centros de pesquisa em ciências do solo (Hartemink, 2016).

A falta de informações abrangentes sobre solos em escala global, nacional ou local aumenta o risco de se tomar decisões políticas equivocadas, e manter uma contínua degradação evitável deste recurso, que poderá ser irreversível, causando problemas relacionados à segurança alimentar, além de provocar danos a outros recursos terrestres como a água e atmosfera (Mulder et al., 2011).

Devido à complexidade de um sistema pedológico, uma série de técnicas, que fazem mensuração de umidade, composição, cor, fração e

profundidade tem sido empregada no mapeamento afim de se obter resultados mais precisos e confiáveis. Para se fazer estas mensurações indiretas, a utilização de ondas eletromagnéticas através de Georadar, sensores orbitais, que são emissores e receptores, e expressam suas informações em radargramas ou em curvas espectrais, tem sido utilizada com maior frequência.

Um levantamento pedológico para fins de mapeamento ocorre com o uso de “ferramentas convencionais”, envolvendo fotointerpretação (com a utilização de bibliografias prévias), com a delimitação das unidades fisiográficas (SOUZA et al., 2016). Esta ferramenta primaria facilita a próxima etapa que envolve a coleta e verificação dos dados de campo, tanto para a confirmação quanto para correção de dados. Os limites entre as zonas homólogas são de difícil diagnóstico em campo, tendo em vista que a fronteira entre solos nunca ocorre de maneira abrupta, mas é transicional ou gradual, exigindo técnicas holísticas apuradas.

Mas segundo Demattê et al. (2016), o sensoriamento remoto se apresenta como uma alternativa para a delimitação de solos, tendo em vista a eficiência e velocidade dos mapeamentos através de sensores orbitais, que em um curto espaço de tempo tem oferecido produtos com acurácia cada vez maior. As técnicas de sensoriamento envolvem variadas classes de sensores, mas para este trabalho apenas duas serão abordadas, envolvendo os sensores multiespectrais e os sistemas ativos com radares de abertura sintética (SAR). Outros métodos envolvendo ondas eletromagnéticas como o Georadar, também tem se apresentado como ótimas opções de técnicas não destrutivas e de bom custo benefício (Van Dam, 2012).

A União Internacional de Ciência do Solo (IUSS), já no ano de 1960, em seu 7º congresso, previu a necessidade e importância dos mapas de solos, e com o acompanhamento da FAO e da UNESCO, recomendou que fosse construída uma base de dados com relatórios e um mapa de solos mundial na escala de 1:5.000.000. Este projeto teve início no ano de 1961 e foi concluído vinte anos depois, cujo os resultados produzidos, envolvendo mapas e relatórios, estão disponíveis no site da FAO (2019).

Além das bases de dados globais, existem inúmeras bases de diversas nacionalidades, de

forma que há muita informação disponível sobre o solo. No entanto, um grande problema é a inconsistência na aquisição de dados, porque as informações são coletadas por diferentes pesquisadores, em várias escalas, usando diferentes padrões e métodos, além destes fatores a crescente disponibilidade de ferramentas no mercado tem produzido resultados em tempo muito menor, pois a aquisição de dados se tornou muito mais rápida e eficiente. Porém, o problema gerado é como estes dados estão sendo tratados, processados e difundidos. Estes produtos que chegam ao meio científico são confiáveis? Existe a possibilidade de se chegar às ferramentas ideais e ao processamento adequado para se gerar mapas e outros produtos relacionados a pedologia sem grandes distorções da realidade, ou equívocos que prejudiquem no uso ou manejo do solo?

O objetivo deste trabalho é realizar uma pesquisa das metodologias indiretas aplicadas em mapeamento de solos, visando a eficiência dos diferentes métodos para esta finalidade, além das possíveis integrações entre essas e as ferramentas diretas, que compreende a coleta de amostras, tradagem e pedomorfometria. As técnicas indiretas que serão abordadas envolvem Georadar, obtenção de curvas espectrais através do sensor como o

FieldSpec, e imagens de radar como Alos Palsar (disponibilizada gratuitamente).

Mapeamento digital de solos

O desenvolvimento de cenários pedológicos, e soluções para a preservação, manutenção e uso sustentável requerem informações e conhecimento das propriedades e das funções do solo. Além disso, se faz necessário que as informações estejam disponíveis de maneira espacial, para que possam ser facilmente atualizadas e usadas para uma série de estudos e interpretações (Arrouays et al., 2017).

Tradicionalmente, imagens de sensoriamento remoto têm sido usadas para apoiar a segmentação da paisagem em unidades de solo-paisagem bastante homogêneas para as quais a composição do solo pode ser estabelecida por amostragem. Usada como uma fonte de dados secundária, as imagens de sensoriamento remoto podem suportar a interpolação espacial de dados de propriedades do solo amostrados de forma esparsa (Mulder et al., 2011). O processo de interpolação é uma das ferramentas mais comuns na análise de imagens em sensoriamento remoto. Algumas aplicações de interpolação permitem reconstrução, restauração e ampliação de imagens (Khosravi e Samadi, 2019).

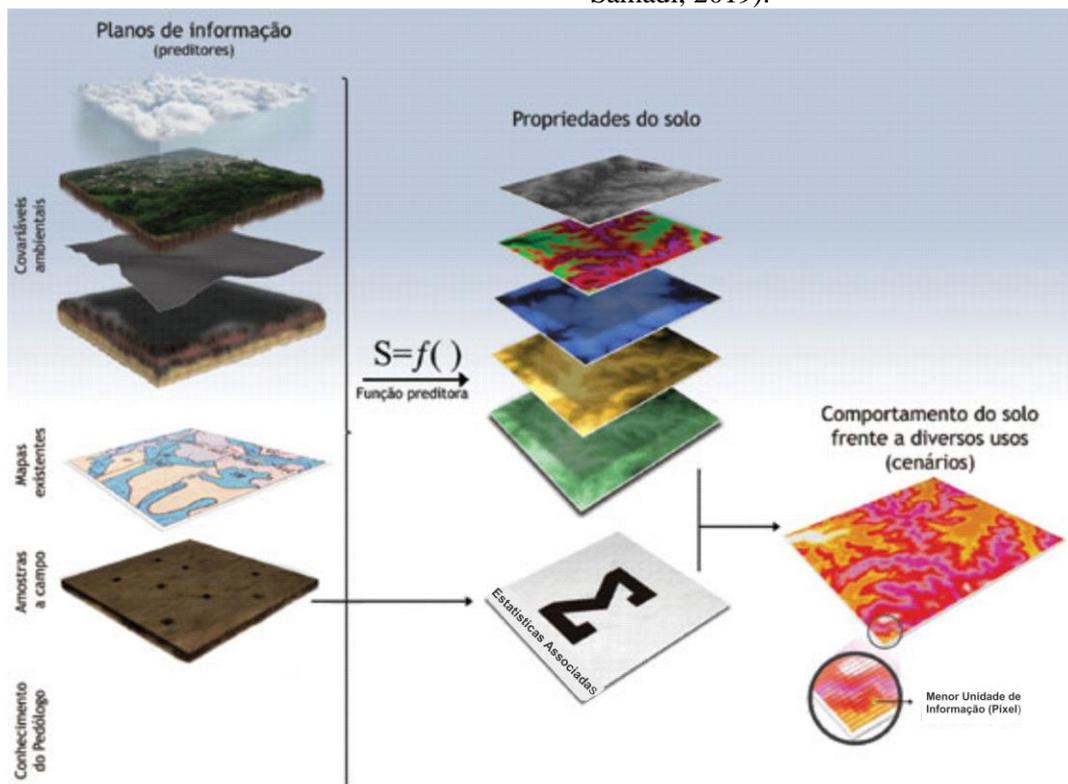


Figura 9. Conjunto de informações para o mapeamento digital de solos. Fonte: Caten et al., 2012.

O mapeamento digital de solos (MDS) é um conjunto de técnicas que visa compilar dados de coleta, armazenamento, análise, interpretação em um mapa de solos, permitindo a predileção da distribuição espacial das classes pedológicas, conforme está ilustrado na Figura 9. Dobos et al. (2002) utilizou-se do termo “mapeamento digital do solo” como forma de integrar mapas de solo com imagens de sensoriamento por satélite e modelo de elevação digital (MDE). Mas este tipo de trabalho passou a ser amplamente reconhecido e divulgado a partir do primeiro “Global Workshop” sobre Mapeamento de Solos Digitais que foi organizado em Montpellier em 2004 (Lagacherie et al., 2007), após a publicação de um artigo sobre mapeamento digital do solo (Mcbratney et al., 2003). No MDS, utilizam-se dados e informações de solos existentes, aliados a novas tecnologias (imagens de sensores remotos, sistemas de informação geográfica, instrumentos para a coleta in situ e georreferenciada), os quais permitem, por meio de modelagem matemática, a elaboração de mapas de diversos atributos e de classes de solo, com acurácia conhecida (Lagacherie et al., 2007).

O sucesso do mapeamento digital do solo é uma confluência de vários fatores, que teve início na década de 2000, e incluiu o aumento da disponibilidade de dados espaciais (modelo de elevação digital, imagens de satélite), a disponibilidade e evolução do poder computacional para processar dados, o desenvolvimento de ferramentas de mineração de dados, GIS e inúmeras aplicações além da geoestatística (Minasny e Mcbratney, 2016; Arrouays et al., 2017). A modelagem matemática através da mineração de dados tem sido aplicada em vários estudos pedológicos, como nos trabalhos Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016, que fez uso de seis técnicas incluindo redes neurais artificiais, regressão vetorial de suporte, vizinho knearest, florestas aleatórias, modelos de árvores de regressão e programação genética que foram combinados com splines de suavização de áreas iguais, afim de se determinar as variações laterais e verticais de matéria orgânica nos solos da região de Baneh, Irã. E embora os resultados não tenham sido

satisfatórios como o esperado, este tipo de técnica tem evoluído.

Em trabalhos recentes, como o de Biswas e Zhang (2018), tem se utilizado com maior frequência o Design de Amostragem (DA), para aumentar a eficiência do MDS, já que uma boa cobertura dos recursos no espaço garante uma estimativa precisa dos parâmetros de regressão, enquanto que a cobertura espacial contribui para a efetiva interpolação. Basicamente, esses dados tem a finalidade de espalhar uniformemente informações de coletas locais em uma região, com base em inferências estatísticas rigorosas (Royle e Nychka, 1998), de forma que cada unidade de amostragem é selecionada aleatoriamente e de maneira independente. Todas as potenciais unidades de amostragem têm probabilidades iguais de serem incluídas e, assim, permitem estimativas imparciais da média e da variância, tomando precauções como por exemplo não colocar artificialmente mais pontos em “áreas suspeitas”, com maior variabilidade espacial em um campo heterogêneo.

Em MDS, os atributos topográficos primários (Declividade e Curvatura do Terreno) e secundário (Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos - ICTS) podem ser utilizados como variáveis na equação do modelo, e podem ser obtidos em qualquer Modelo Digital de Elevação de Terreno, assim, serão trabalhados através de softwares de SIG (Silva et al., 2018).

Para Wood (2009), os programas de código fonte fechados limitam a comunicação dos procedimentos executados para a obtenção de determinado resultado, uma propositiva a este problema seria a utilização de programas com código fonte aberto (SAGA, GRASS, ILWIS, QGIS e o pacote estatístico R por exemplo), que tem uma grande rede de colaboradores. O autor realizou um estudo detalhado sobre o uso de alguns softwares abertos e fechados, criando algumas tabelas sobre a relação de uso de alguns softwares, tendo como ponto de partida a sua disponibilidade no mercado, e por quanto tempo foram utilizados, até a criação de uma nova versão.

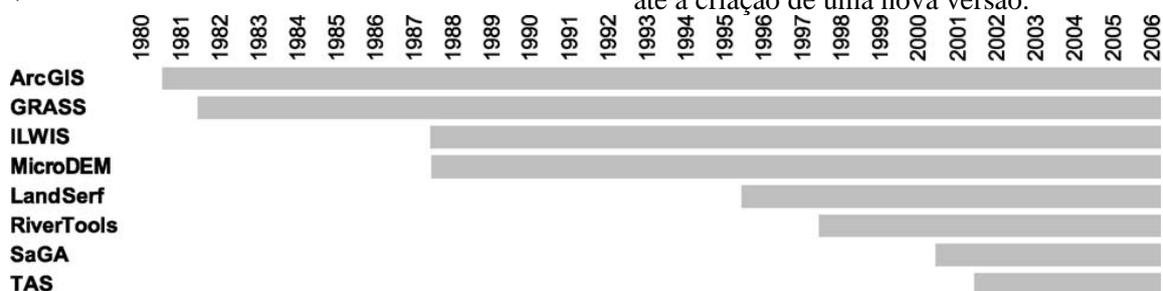


Figura 10. Cronogramas mostrando a disponibilidade pública do software de geomorfometria. Fonte Wood, 2009.

Já foi realizado um levantamento bibliográfico vasto sobre os trabalhos de MDS brasileiros até o ano de 2011, e foi verificado que o primeiro trabalho deste gênero ocorrido no Brasil foi apenas no ano de 2006, período em que foi sediado, no Rio de Janeiro, o 2º Workshop Global em Mapeamento Digital de Solos. Segundo o autor, este interesse mais recente pode ter ocorrido devido a disponibilidade tardia de hardwares e softwares no país.

Segundo Caten et al. (2012), o MDS aplicado à predição de classes de solos no Brasil tem ocorrido em níveis de semidetalhe, que compreende uma escala de 1:50.000. O autor afirma ainda que estes mapas de solos têm condicionado a extensão territorial da maioria dos trabalhos. Entre os estudos de MDS realizados no país, predomina a utilização de softwares proprietários.

Até o momento, diversos autores trabalharam com variadas fórmulas e modelos para desenvolver um MDS, mas não há uma metodologia coerente estabelecida, onde abordagens de segmentação espacial, medidas de propriedades do solo e interpolação usando dados de sensoriamento remoto são integrados de forma holística para alcançar uma cobertura completa da área, porém a precisão deste tipo de técnica tem melhorado, e quando associada a outras

ferramentas, tem produzido bons mapas e outros subprodutos importantes para uso, manejo e conservação do solo.

O cenário para o uso de ferramentas voltadas para a criação de MDS tem se mostrado favorável, principalmente no que tangencia as técnicas de coleta, processamento de dados, formação e desenvolvimento de modelos.

Georadar

A utilização do Georadar para estudos de solo e rocha *in situ* tem avançado nas últimas décadas (Neil, 2004), sendo que as primeiras utilizações de ondas de rádio de alta frequência para mapeamento de estruturas em subsuperfície foram realizadas no fim da década de 1920 por W. Stern. Devido ao emprego de ondas eletromagnéticas o Georadar é capaz de detectar discontinuidades elétricas na subsuperfície rasa (profundidades <50 m), através de pulsos de alta frequência destas ondas, geradas, propagadas e recebidas pelo próprio equipamento. Este através do comportamento (reflexão) da energia no meio em questão é capaz de identificar alvos (objetos soterrados) e variações composicionais na direção vertical conforme ilustrado na Figura 11 (estratigrafia de solos e rochas) (Karim et al., 2019).

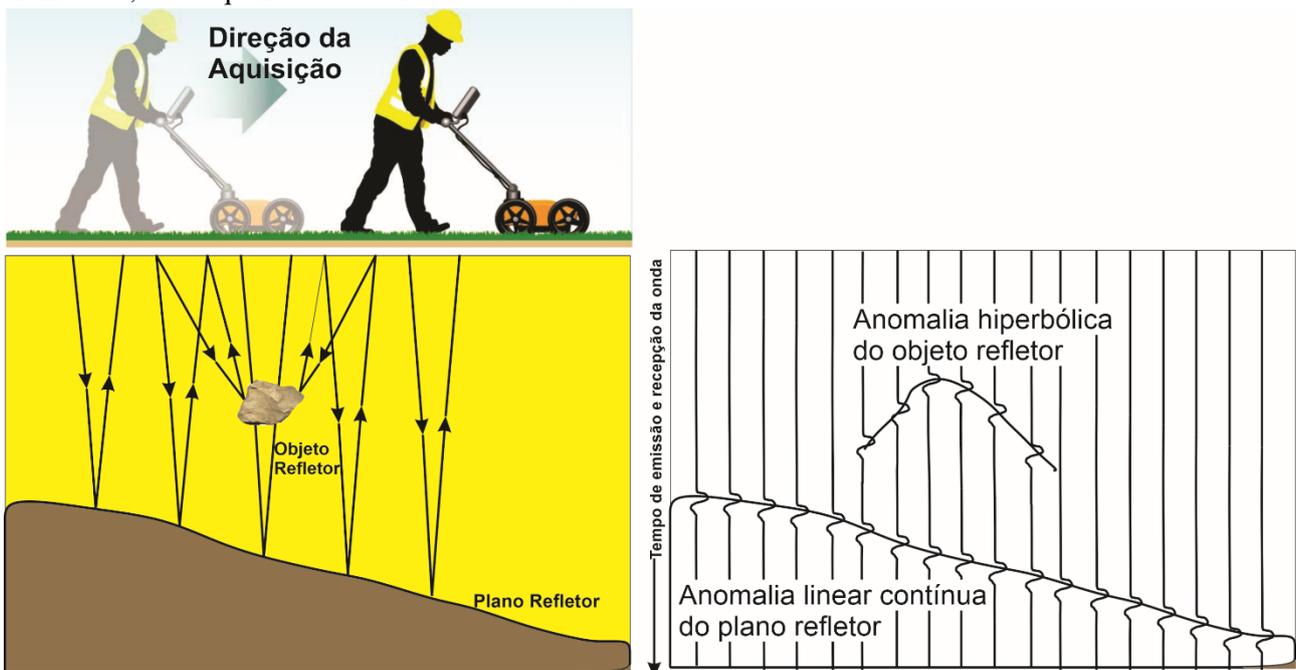


Figura 11. Aplicação do método GPR.

Os sistemas de GPR contam com diversos tipos de antenas disponíveis no mercado, as mais usuais são as que apresentam um conjunto de

antenas, transmissora e receptora, com a execução de perfis de reflexão, no qual a antena que emite e recebe a onda é transportada ao longo do perfil.

Este tipo de aquisição é feita através das reflexões versus o deslocamento da antena, cujo o resultado obtido apresenta no eixo vertical da imagem as variações das propriedades elétricas em função do tempo (de emissão e recepção da onda), e na posição horizontal o deslocamento da antena (Nunes et al., 2019).

As ondas de rádio empregadas apresentam frequência entre 10 MHz e 2,6 GHz, obtendo informações relacionadas à subsuperfície, através do cálculo da permissividade dielétrica do solo. A penetração depende também do material estudado, podendo variar de 5 a 50 metros, e a resolução da imagem produzida no radargrama, que pode variar de 0,5 a 100 centímetros (Caselle, et al., 2020; Jol e Bristow, 2003).

A facilidade de repetição do método para um mesmo perfil de solo, tanto para a validação de resultados, quanto para a correção de erros que possam ocorrer durante a aquisição, é outro fator de vantagem desta ferramenta não destrutiva, e de fácil execução (Zajícová e Chuman, 2019).

A ferramenta Georadar apresenta seus dados como uma resposta da propagação das ondas eletromagnéticas na forma de imageamento de representação de descontinuidades elétricas, frente a propagação e reflexão das ondas que compõe um Radargrama, no qual é feito uma identificação de padrões representativos destas descontinuidades, na forma de agrupamento de respostas associadas a um padrão de reflexão, correlacionado com o alvo a ser identificado. O método se baseia no coeficiente de reflexão da superfície, e não no tempo de transmissão do meio (Slater e Comas, 2009).

No que se refere à investigação da profundidade dos solos, o Georadar já é considerado uma ferramenta com eficiência comprovada. Alguns trabalhos como o de Zhang et al, 2018, que investigou pacotes pedológicos na província de Sichuan, na China, em uma grade com 10 KM de espaçamento entre uma linha e outra, demonstram que o Georadar é capaz de obter com precisão e rapidez a profundidade do solo. Os dados foram associados à geoestatística, sendo indiferentes à topografia do terreno pesquisado, obtendo uma diferença de apenas 3cm em média entre os dados diretos e indiretos.

O solo é constituído por diferentes fases (sólida, líquida e gasosa), que definem a permissividade dielétrica deste meio, que será proporcional a contribuição de cada uma destas fases. Salat e Junge (2010) demonstraram uma correlação linear entre a permissividade dielétrica e a densidade de massa seca de um solo, indicando que a permissividade de solos secos depende fortemente de sua porosidade e compactação. Segundo os autores a compactação do solo diminui a porosidade, e conseqüentemente a fase gasosa do sistema, aumentando a permissividade dielétrica. Com este tipo de informação André et al. (2012), conseguiu identificar camadas de solos compactadas por máquinas agrícolas com o uso do Georadar.

A variação da permissividade dielétrica do solo tem sido objeto de estudo de diversos autores, como Cassidy (2009), que chegou à conclusão que a composição mineral pode afetar diretamente este fator.

Ao se utilizar Georadar para estudos pedológicos deve-se considerar a quantidade de água presente no sistema, pois segundo Annan, 1992, a atenuação do sinal da antena é diretamente proporcional a condutividade elétrica do meio, sendo que a presença de água reduz consideravelmente a faixa real de profundidade alcançada pela onda eletromagnética, efeito semelhante ao provocado pela presença de argila no solo. Mas apesar do efeito citado, De Benedetto et al (2009), não conseguiu um resultado positivo com o uso do Georadar para mensuração de argila presente no solo.

Considerando que o solo é multifásico, a água deste sistema poderá apresentar diferentes composições em camadas distintas. A fase líquida não apresentará quebras contínuas, mas sim uma variação gradual vertical, um exemplo desta hipótese seria um mesmo sistema pedológico contendo a água capilar e a água adsorvida na região de uma superfície freática. E com variações composicionais diferentes (saturação ou não em alguns elementos como sais e óxidos), tem-se também variações na permissividade da onda (Huang et al, 2013).

O Georadar já foi utilizado até mesmo para investigar a distribuição de cobre (Cu) em solos de países da União Europeia, de forma que Ballabio et al (2018), utilizou-se de Georadar associado a

krigagem para mapear a concentração de cobre no solo superficial. O GPR mostrou-se eficiente na previsão da concentração de Cu, especialmente em combinação com a krigagem.

A água é a substância com maior permissividade presente no solo, e quando apresenta alta concentração no meio em questão, poderá influenciar a permissividade de outros materiais, o autor diz que esta característica permite fazer estimativas da quantidade de água

presente no solo (Liu B. et al., 2019). Thomas et al. (2006), também constatou que a área superficial específica de solos argilosos é elevada, o que pode acarretar em diminuição da permissividade se o teor de água for elevado neste tipo de solo, e isso quando não houver perdas de condutividade, devido à presença de partículas negativas que favorecem as trocas catiônicas. A relação entre a permissividade e a fração do solo é demonstrado na Figura 12, para um solo com alto teor de caulinita.

$\epsilon - \sigma$ (Textura do solo, temperatura, 1,5 GHz)

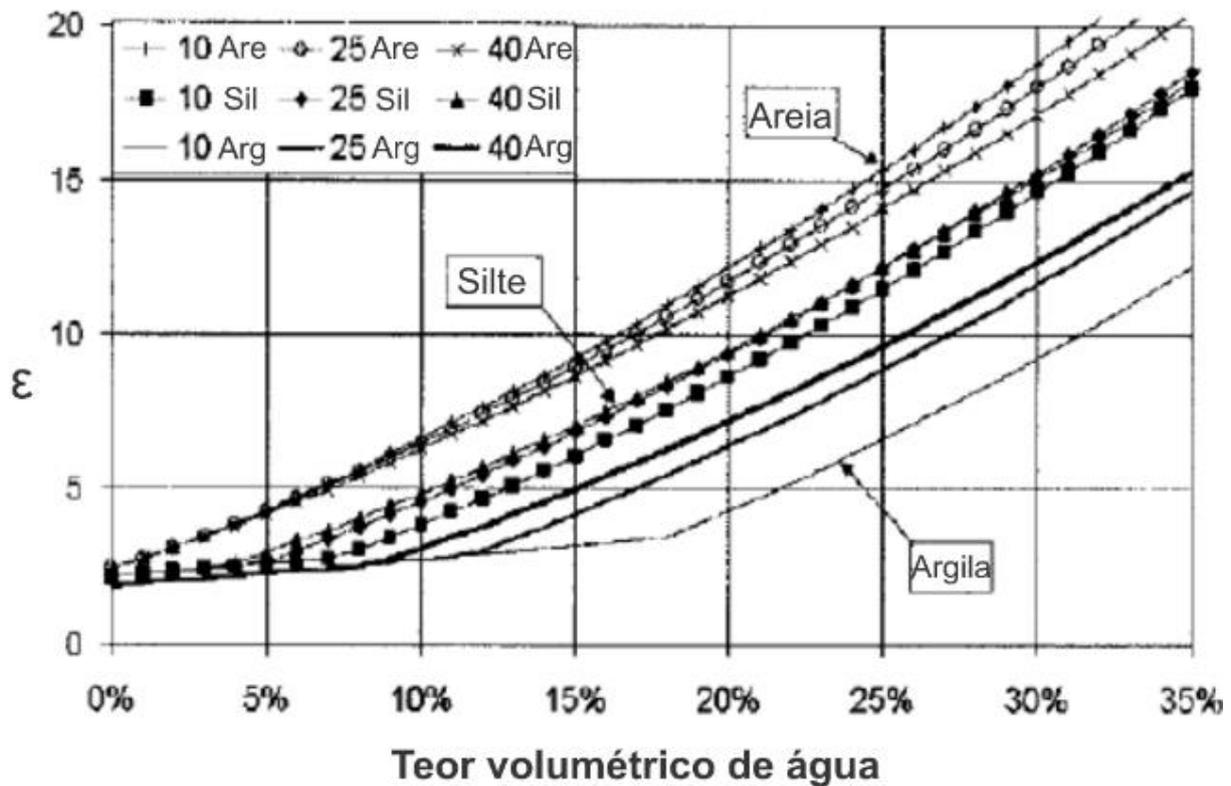


Figura 12. Variação da permissividade relativa com o aumento do teor de água em um solo com alto teor de caulinita. Fonte: Thomas et al. (2006).

Chanzy et al (1996), demonstrou que o erro para a determinação da umidade na camada superficial (10 a 20cm), foi de no máximo 0,046 m³/m³. Através da antena de 200 MHz foram mensurados valores de tensão, registrados pelo receptor durante 200 ns. De forma que para análise dos resultados foram verificados traços de solo seco em contraposição aos traços de solo úmido, comparando ondas entre 0 e 10ns com ondas entre 25 e 45 ns, que representam profundidades distintas. Os valores de picos das ondas eletromagnéticas, obtidos entre 65 e 75 MHz, são considerados traços do GPR relacionados a umidade segundo as teorias de Fourier. Como é possível fazer uma estimativa coerente da presença

de umidade no solo, outros autores trabalharam com GPR buscando esta finalidade (Ardekani, 2013; Lambot et al., 2008; Minet et al., 2012; Minet et al. 2011; Afshar, et al., 2015; Algeo, et al., 2016; Liu, et al., 2017; Wu, et al., 2019).

Zajícová e Chuman (2019), investigaram métodos para mensurar a quantidade de água no solo a partir do uso de Georadar com base na inversão de forma da onda. Para isso fizeram análises de velocidades do sinal eletromagnético, das reflexões e do comportamento das ondas, com ênfase nos horizontes orgânicos e detecção de raízes de árvores.

Tabela 3. Resumo dos estudos de solo que empregaram métodos GPR, organizados por sua aplicação e método.

Aplicação	Método	Estudos
<i>Teor de água no solo</i>	Análise de velocidade a partir do tempo de viagem bidirecional de uma onda refletida por um refletor conhecido	Ercoli et al., 2018; van Overmeeren et al., 1997
	Análise de velocidade por "ponto médio comum"	Greaves et al., 1996; Koyama et al., 2017; Lu et al., 2017; Steelman and Endres, 2012; van Overmeeren et al., 1997
	Velocidade da onda no solo	Ardekani, 2013; Galagedara et al., 2005a, 2005b, 2003; Grote et al., 2003; Huisman et al., 2001; Lu et al., 2017; Pallavi et al., 2010; van Overmeeren et al., 1997
	Velocidade e dispersão da onda guiada	Arcone et al., 2003; Mangel et al., 2015; Rege and Godio, 2012; Strobbia and Cassiani, 2007; van der Kruk et al., 2010, 2006
	Coeficiente de reflexão	Hagrey e Müller, 2000; Ardekani, 2013; Reppert et al., 2000
	Análises de sinais adiantados	Algeo et al., 2016; Benedetto, 2010; Comitè et al., 2016, 2014; Di Matteo et al., 2013; Ferrara et al., 2013; Pettinelli et al., 2014, 2007
	Inversão completa da onda	Ardekani et al., 2014a; Ardekani, 2013; Lambot et al., 2008, 2006, 2004, Minet et al., 2012, 2011; Mourmeaux et al., 2014; Tran et al., 2015; Weihermüller et al., 2007
	Outras modelagens aproximadas envolvendo inversão da forma da onda	Ardekani et al., 2014a; Ardekani, 2013; Lambot et al., 2008, 2006, 2004, Minet et al., 2012, 2011; Mourmeaux et al., 2014; Tran et al., 2015; Weihermüller et al., 2007
<i>Salinidade do solo</i>	Coeficiente de reflexão	Hagrey and Müller, 2000
<i>Textura do solo</i>	Análise do sinal antecipado	Benedetto and Tosti, 2013; Meadows et al., 2006; Tosti et al., 2013
	Abordagens de modelagem por inversão de formas de onda	Busch et al., 2014
<i>Estratigrafia do perfil do Solo</i>	Imagens de reflexão	André et al., 2012; Nováková et al., 2013; Simeoni et al., 2009; Zhang et al., 2014
	Abordagens de modelagem por inversão de formas de onda	Buchner et al., 2012
<i>Estimativa da Espessura de horizontes orgânicos</i>	Imagem de reflexão	Li et al., 2015; Winkelbauer et al., 2011
	Inversão completa da onda	André et al., 2016, 2015, 2014
<i>Estratigrafia de turfeiras</i>	Imagem de reflexão	Comas et al., 2017, 2015; Fyfe et al., 2014; Karuss and Berzins, 2015; Kettridge et al., 2012, 2008; Laamrani et al., 2013; Parry et al., 2014; Parsekian et al., 2012a; Parsekian et al., 2012b; Plado et al., 2011; Proulx-McInnis et al., 2013; Rosa et al., 2009; Sass et al., 2010; Slater and Reeve, 2002; Walter et al., 2016
<i>Gases biogênicos em turfeiras</i>	Imagem de reflexão	Comas et al., 2008, 2005; William and Comas, 2016
	Análises da velocidade do sinal	Chen and Slater, 2015; Parsekian et al., 2012a; Strack and Mierau, 2010
	Análises espectrais da frequência do sinal	Terry and Slater, 2017
<i>Raízes e sistema radicular</i>	Imagem de reflexão	Borden et al., 2016; Freeland, 2015; Guo et al., 2013b; Hirano et al., 2009; Li et al., 2016; Q. Liu et al., 2018; Raz-Yaseef et al., 2013; Rodríguez-Robles et al., 2017; Tanikawa et al., 2013; Tardío et al., 2016; Wu et al., 2014; Yeung et al., 2016
<i>Diâmetros de raiz e biomassa</i>	Índices extraídos da força do sinal ou da forma de onda	Barton and Montagu, 2004; Borden et al., 2014; Cui et al., 2011; Hirano et al., 2009; Q. Liu et al., 2018; X. Liu et al., 2018; Rodríguez-Robles et al., 2017; Simms et al., 2017; Stover et al., 2016; Zhu et al., 2014

Fonte: Zajícová e Chuman (2019).

Não existe uma padronização de processamento para Georadar, tendo sido

observado que várias metodologias aplicadas corretamente fornecem suporte para variadas

inferências em um radargrama ou seção de Georadar. E se levar em consideração, que cada solo, em diferentes latitudes poderá apresentar características particulares que implicam em respostas diferentes no equipamento, necessitando adequar filtros ou ganhos de sinal. O método é amplamente utilizado em pesquisas pedológicas como também em áreas subjacentes, e embora não haja uma padronização no processamento, seus resultados podem ser correlacionados a outros métodos para um mapeamento de solos, principalmente para identificação de profundidades.

Espectrorradiometria

A radiometria é a ciência que estuda a medição da energia radiante eletromagnética, ou seja, a interação da radiação com um alvo pode ser mensurada e quantificada/qualificada por técnicas de radiometria. As quantidades de energia envolvidas são denominadas grandezas radiométricas, podendo ser mensuradas em campo ou laboratório, através de radiômetros. Entre as grandezas quantificadas no processo, a principal é a energia radiante (Q), a partir do qual são derivadas as demais grandezas, como: radiância (L), irradiância (E), fluxo radiante (f), exatância

(M), intensidade radiante (I) (Steffen e Moraes, 1993) (Carney e Johnston, 2016).

Quando a energia radiante, ou qualquer outra relacionada a ela, é mensurada em termos de seus componentes monocromáticos, torna-se uma função do comprimento de onda. Portanto, as designações para essas quantidades devem ser precedidas do adjetivo “espectral”, por exemplo como no uso do termo “irradiação espectral”.

Considerando que a radiometria envolve a medição da energia radiante total emitida pela fonte radiante sobre todo o espectro óptico (1 nm a 1000 μm), e que a espectrorradiometria está relacionada com o conteúdo espectral da fonte radiante, medidas radiométricas realizadas a partir de espectrorradiômetros portáteis ou mantidos em ambiente controlado (laboratórios), operam em faixas espectrais estreitas e numerosas (Figura 13).

A radiometria permite a caracterização espectral de objetos e a condução de experimentos visando a calibração absoluta de sensores remotos. esta característica a diferencia da fotometria que se refere apenas à porção do espectro óptico a que o olho humano é sensível (380 nm a 780 nm) (Price et al., 2019).

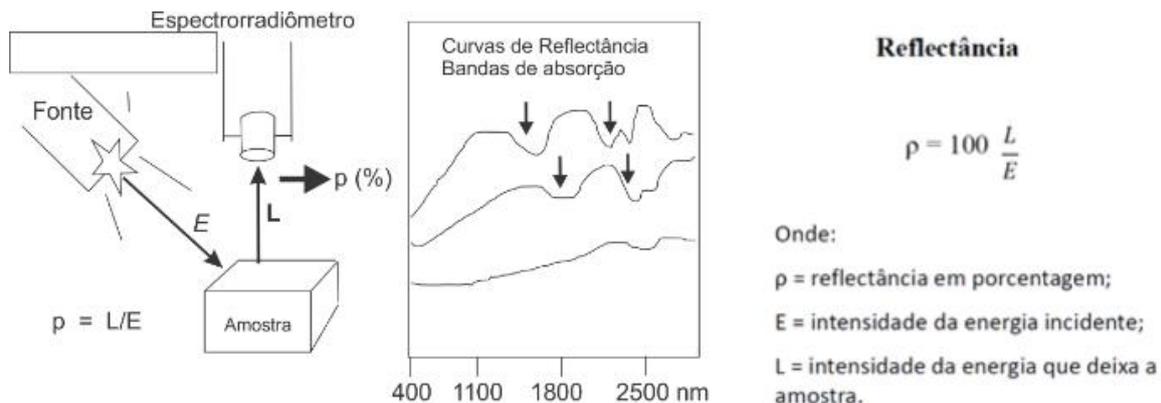


Figura 13. Esquema ilustrando a espectrorradiometria. Fonte: Meneses, 2001.

Pesquisadores de várias partes do mundo têm estimado diversas propriedades do solo como pH, condutividade elétrica, carbono orgânico, argila, silte, areia, soma de bases, capacidade de troca de cátions, ferro total, além de características de fertilidade como ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn), utilizando-se de ondas, cuja a faixa espectral variam entre o visível, o infravermelho próximo e o infravermelho médio, apresentando resultados com diversos graus de confiabilidade (Ben-Dor & Banin, 1995; Stenberg et al., 2002; Islam et al., 2004; Nanni e Demattê,

2006; Brown et al., 2006; Demattê et al., 2017; Lamine et al., 2019; Cezar et al., 2019; Rodrigues et al., 2019).

O método tem sido utilizado frequentemente em pesquisas voltadas para estudos pedológicos, a exemplo dos trabalhos de Demattê e Nanni (2003), Chang et al. (2001), Shepherd e Walsh (2002), Daniel et al. (2003), Stenberg et al. (2010), e Cezar et al. (2013) nos quais foram utilizados métodos estatísticos como regressão linear múltipla, mínimo quadrado, regressão

multivariada splines, e redes neurais, para relacionar o espectro com os atributos do solo.

A quantificação de atributos do solo estudados por meio de sua curva espectral é baseada em suas características que envolvem a absorção de energia eletromagnética em níveis ou em intervalos específicos da curva, uma vez que, diferentes quantidades de determinados elementos presentes no solo podem aumentar ou diminuir a reflectância espectral em comprimentos de onda específicos do espectro eletromagnético (Nanni, 2000). Para Rodrigues et al. (2019), o uso da espectrorradiometria para determinar as propriedades químicas, físicas e mineralógicas do solo mostrou resultados favoráveis quando investigado na região espectral visível (VIS: 400-700 nm).

Segundo Price (1994), é esperado que uma única assinatura espectral permita a identificação da maioria dos tipos de superfície de rochas, solos e vegetação, desde que a resolução espacial dos dados seja suficiente para representar um único tipo de superfície para cada espectro, porém a mistura espectral cria uma complicação de dados, de modo que é necessário explorar a possibilidade de identificar componentes individuais dentro do sinal misto, provenientes de vários tipos de superfície. Como é sugerido pelo autor pode-se distinguir alguns elementos facilmente, no entanto existem casos nos quais os espectros apresentam muitas similaridades em todos os comprimentos de ondas. Para melhor discriminação destes espectros faz-se necessário uma comparação no campo

quantitativo, para tal deve-se estabelecer uma métrica que descreva a diferença entre os espectros.

Para Cathcart et al., (2004), processos naturais, como intemperismo, precipitação, infiltração de água, etc, darão origem a mudanças nas características de assinatura para solos e seus constituintes individuais. Portanto é importante entender a origem e o impacto dos processos naturais e artificiais nas características de assinatura subjacentes, a fim de definir precisamente as condições e restrições sob as quais a detecção dessas atividades feitas pelo homem pode afetar a resposta espectral.

Selige et al. (2006) diz que a criação de bibliotecas espectrais, teria como finalidade a utilização de dados em sensoriamento remoto como medições de radiância ou refletância in situ para a calibração e / ou seleção de membros finais no processamento de dados adicionais. Uma outra possibilidade para emprego destas medições seria para avaliação laboratorial rápida por espectroscopia de reflectância difusa (DRS) através das propriedades do solo (Viscarra Rossel et al. 2006; Brown 2007).

Viscarra Rossel (2008), começou a elaborar uma biblioteca global de espectros de solos, que recebeu várias atualizações, e até 2016 já havia mais de 23.600 respostas espectrais de solos de 12.509 localizações diferentes conforme está ilustrado na Figura 14 (Viscarra Rossel et al., 2016).

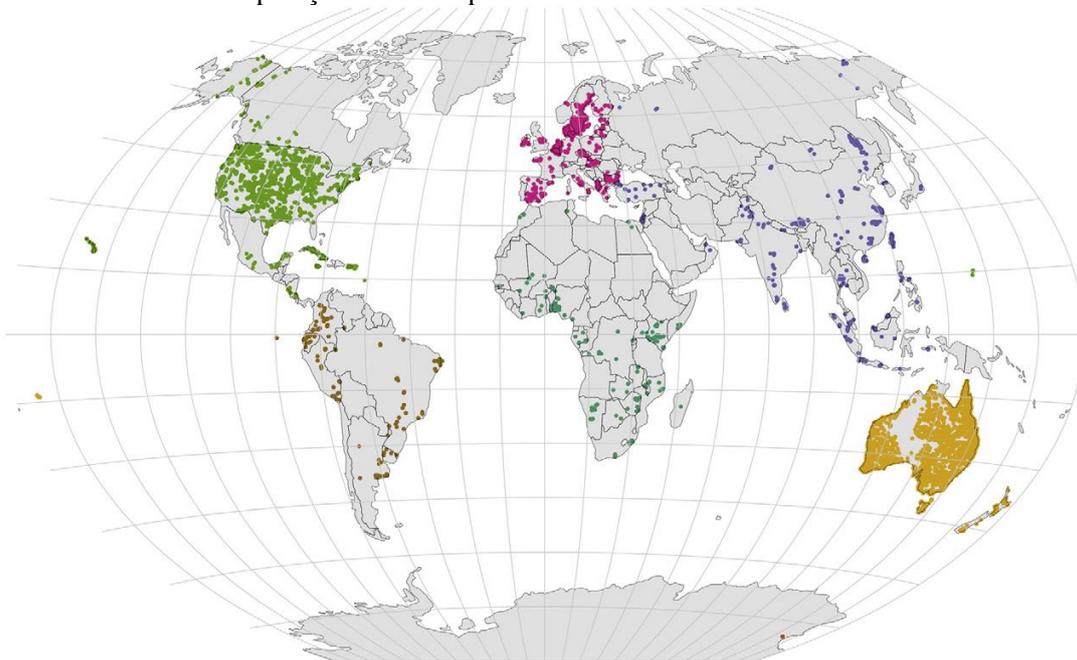


Figura 14. Localizações dos 12.509 pontos de resposta espectral que estão no banco de dados global. Fonte: Viscarra Rossel, 2016.

Nas últimas décadas, os trabalhos envolvendo espectrorradiometria para o mapeamento digital de solos tem se multiplicado. O trabalho de Brodský et al. (2011) se propôs a construir uma biblioteca espectral de solos Checos. Segundo o autor, esta biblioteca deve conter um banco de dados e metadados que armazena as informações auxiliares correspondentes dos solos, como tipo de material (solo, material parental), preparação da amostra, localização da amostra com coordenadas geográficas, classificação do solo, características morfológicas, medições laboratoriais do solo, propriedades biológicas, químicas, físicas e potenciais, características geofísicas além de informações climatológicas sobre a localização da amostra.

O Brasil possui uma biblioteca com mais de 39 mil amostras (Figura 15) doadas por 65 colaboradores representando 41 instituições dos 26 Estados brasileiros e do DF, esta equipe de pesquisa é conduzida pelo Dr. Demattê da Universidade de São Paulo. A equipe recebe vários tipos de amostras classificadas como amostras simples, amostras em profundidade coletada por gradagem; amostras por horizontes de perfis completos. Todas as amostras recebidas são catalogadas, e padronizamos no sensor Fieldspec, em seguida são analisados os espectros e catalogados. Por fim as amostras são indexadas ao banco de dados disponível na Biblioteca Espectral de Solos do Brasil (BESB).

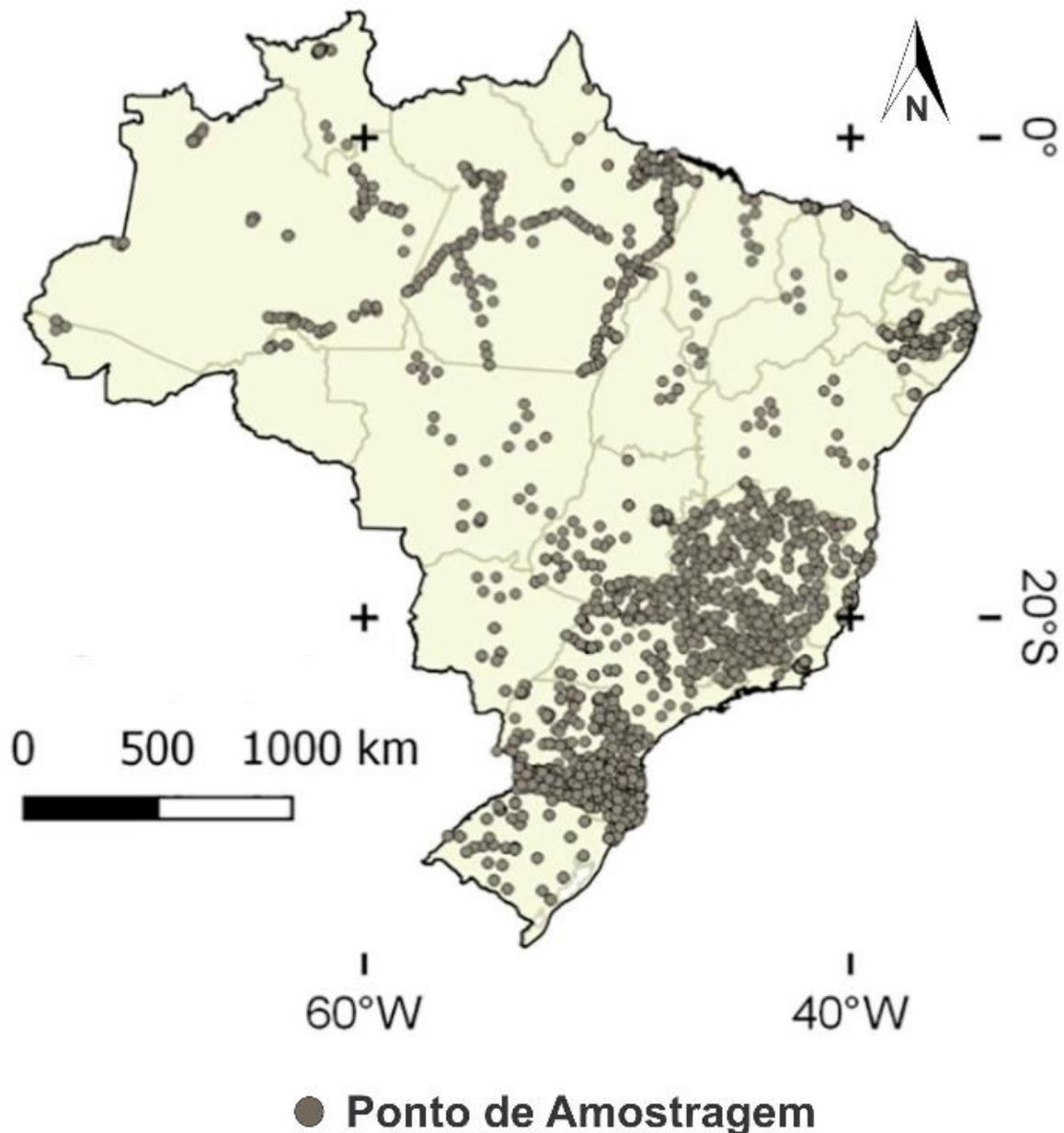


Figura 15. Locais de amostragem da Biblioteca Espectral do Solo do Brasil. Fonte: Demattê et al, 2019.

Comportamento Espectral do Solo

A reflectância do solo é uma propriedade derivada do somatório de diversos fatores que apresentarão o comportamento ou assinatura espectral. Os fatores mencionados incluem combinação heterogênea de componentes como tamanho de partícula, estrutura do solo, rugosidade superficial, umidade, teor de matéria orgânica, teor de minerais carbonatados, presença ou não de quartzo e dos óxidos de Fe (Stoner e Baumgardner, 1981), dentre outros fatores.

Formaggio et al. (1996), demonstraram a possibilidade a possibilidade de caracterizar os

Tabela 4. Principais características das curvas espectrais de solos. Fonte: Condit, 1970. Adaptada por Moraes, 2010.

Tipo de Curva	Região do Espectro	Feição Espectral	Característica do Solo
1	0,32 – 1,00 μm	Baixa Reflectância Forma Côncava	
2	0,32 – 0,60 μm 0,60 – 0,70 μm 0,70 – 0,74 μm 0,32 – 0,75 μm	Gradiente Decrescente Gradiente Acentuado Gradiente Decrescente Forma Convexa	Solos bem drenados pouca matéria orgânica
3	0,32 – 0,60 μm 0,60 – 0,74 μm 0,76 – 0,78 μm 0,88 – 1,00 μm	Gradiente Acentuado Gradiente Pequeno Gradiente Decrescente Gradiente Aumenta c/d	Solos com conteúdo de ferro razoavelmente elevado
4	0,32 – 2,30 μm 0,88 – 1,30 μm	Baixa Refletância Redução da Reflectância	Alto conteúdo de ferro e matéria orgânica
5	0,75 – 1,30 μm	Gradiente Decrescente Não há Banda de Absorção de Água em 1,45 μm	Alto conteúdo de ferro e baixo conteúdo de matéria orgânica

Nos trabalhos de Stoner & Baumgardner (1981), foram caracterizados outros dois padrões de curvas espectrais, complementando a tabela 2 de Condit (1970), estes dados juntamente com os dados produzidos por Fromaggio et al. (1996), foram organizados em gráficos (Figura 16), e

solos através de sensores remotos trabalhando-se com dados de campo e laboratório, demonstrando que os agrupamentos das classes de solos pesquisados não obedeceram às mesmas compartimentações estabelecidas pelo sistema de classificação taxonômica de solos, segundo o critério de comportamento espectral.

Segundo Condit (1970), as curvas espectrais dos solos podem ser tipificadas em 5 classes, organizando faixas espectrais que facilitaram os estudos de propriedades do solo de acordo com a região do espectro:

comparados a solos estudados por Demattê (1992). Desde então, outros trabalhos posteriores tentaram estabelecer relação entre os atributos do solo e a energia refletida, como os de Coleman & Montgomery (1991) e Henderson et al. (1992).

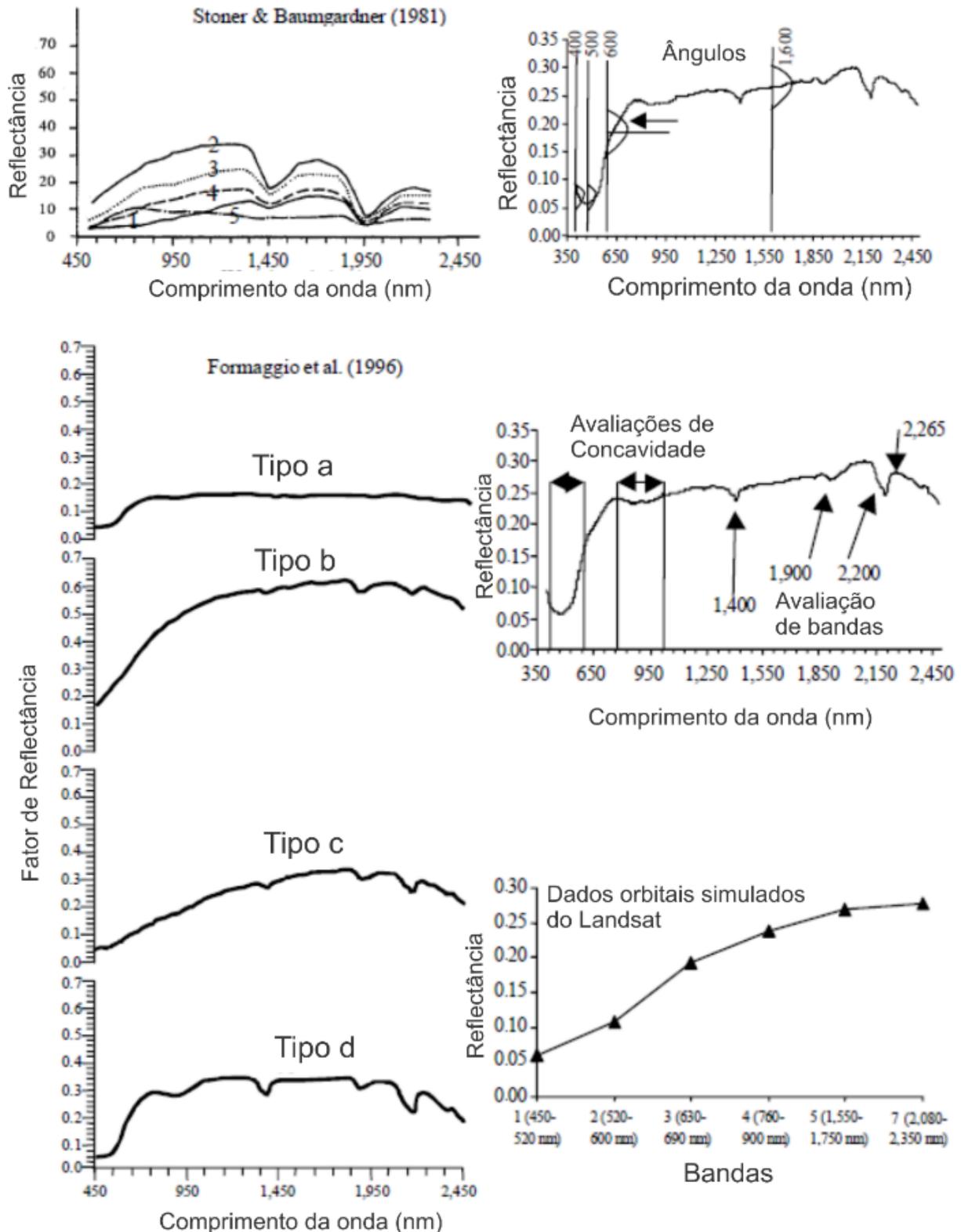


Figura 16. Determinação de ângulos, avaliações de concavidade, banda e dados simulados de curvas espectrais dos solos estudados por Demattê, comparados com as curvas espectrais dos tipos de solo classificados por Stoner & Baumgardner (1981) e Formaggio et al. (1996). Fonte: Demattê, 2002.

O sensoriamento remoto tangencia a refletância, com uma série de operações matemáticas, cujo a finalidade é a produção de imagens que evidencie o alvo ou o objeto de estudo. Para tal fim, as operações utilizadas são

soma ou adição, subtração, multiplicação e divisão entre bandas, com destaque para a última, quando se deseja realçar uma feição ou alvo em uma operação não-linear, pois a divisão entre bandas realça uma assinatura espectral em detrimento da

outra, permitindo a caracterização de algumas curvas (Nanni e Demattê, 2006).

Para se compreender as variações de dados espectrais em nível orbital, é necessário conhecer os solos através da radiometria em laboratório, que reflete a realidade mais próxima do objeto de estudo (Demattê, 1999). Este tipo de pesquisa não é recente, Epiphanyo (1983) verificou os efeitos que a rugosidade de uma superfície e os ângulos de exposição apresentavam sobre a curva espectral do solo, em diversas condições de umidade. Valeriano et al. (1995) estudou o fator de refletância bidirecional em 14 classes de solo no Brasil. Já Meneses e Madeira Neto (2001), realizou estudos do comportamento espectral voltados para o tamanho da partícula.

Existem variadas limitações impostas pelos sensores, as principais estão relacionadas ao número de bandas e a sua largura espectral. Alguns materiais pedológicos poderão ser diferenciados ou identificados caso a largura das bandas espectrais dos sensores imageadores sejam suficientemente estreitas da ordem de 10 nm, que é mais ou menos a largura média das bandas de absorção (Lima, 2011). Embora as regiões espectrais de todo o VIS (350–800 nm), NIR (800–1100 nm), SWIR (1100–2500 nm) possam ser usadas para calibrar modelos para quantificação, a maioria das regiões indesejadas que não contêm informações relevantes relacionados ao atributo de interesse podem gerar ruído nos modelos e aumentar o processamento computacional (Dematte et al 2017).

Radiometria

Kingsley e Quegan (1999), afirmam que radar é tudo o que usa ondas de rádio para detectar a presença de objetos e encontrar sua posição. O termo radar tem sido amplamente aplicado para descrever sistemas que operam na faixa de frequência de micro-ondas, o que o torna um sistema ativo, que ao emitir a onda, esta interage com a superfície, com sinais eletromagnéticos, de forma que o sensor mede o sinal refletido. Neste sistema são empregadas ondas que vão de 1mm à 1m de comprimento, coincidindo com as ondas utilizadas nos sistemas de comunicação (Ulaby et al., 1981).

Segundo Massonnet et al. (1998), as aplicações geofísicas de interferometria de radar

para medir mudanças na superfície da Terra explodiram no início dos anos 90. Mas já entre 1981 e 1984, aconteceram as missões do ônibus espacial colômbia para coleta de dados SAR, nas bandas L, C e X. E a partir da década de 90, vários satélites começaram a fornecer cobertura radar da superfície terrestre, dentre eles, o Radarsat, JERS e ERS.

Os dois tipos de radar mais usuais são os aerotransportados de visada lateral (side-looking airborne radar – SLAR) e os de abertura sintética (Synthetic Aperture Radar – SAR). No primeiro caso, uma antena fixa é a uma plataforma móvel, sendo as ondas propagadas a partir desta fonte. A direção de visada é lateral, em relação à direção de voo da aeronave. Em radares de abertura sintética, uma antena longa virtual é formada através do registro sequencial de amplitudes e fases do sinal retroespalhado por uma antena de dimensões reduzidas (Freneau et al, 1996). E segundo Mura (2000), a aeronave que transporta esta antena deve se deslocar a uma velocidade constante, no qual um emissor envia pulsos de micro-ondas modulados linearmente em frequência, com intervalos regulares.

O SAR mantém a fase e a magnitude do sinal retroespalhado pela superfície imageada, com intuito de aumentar a resolução espacial, sem que seja necessário aumentar o tamanho físico da antena (Figura 17). Ele surgiu por conta da limitação na capacidade de produzir resoluções fina o suficiente para a maioria das aplicações de sensoriamento remoto, pois o transporte de antenas longas é difícil, e aumentaria o custo da aquisição de dados.

O satélite Daichi foi lançado em órbita polar, há uma altura de 691,25 Km, em 24 de janeiro de 2006, portando três sensores de alta resolução, sendo um deles o Radar de Abertura Sintética de Banda L com Estrutura Faseada (PALSAR), de forma que o esperado é que este sensor fosse capaz de monitorar o desmatamento, estimar a biomassa e medir a deformação usando interferometria e diferenciação de amplitude, devido ao maior poder de penetração de sinal do SAR (Radar de Abertura Sintética) através da cobertura vegetal. O PALSAR exige mais tempo de processamento devido ao tempo de azimute mais longo resultante do sinal da banda L (Shimada et al, 2009).

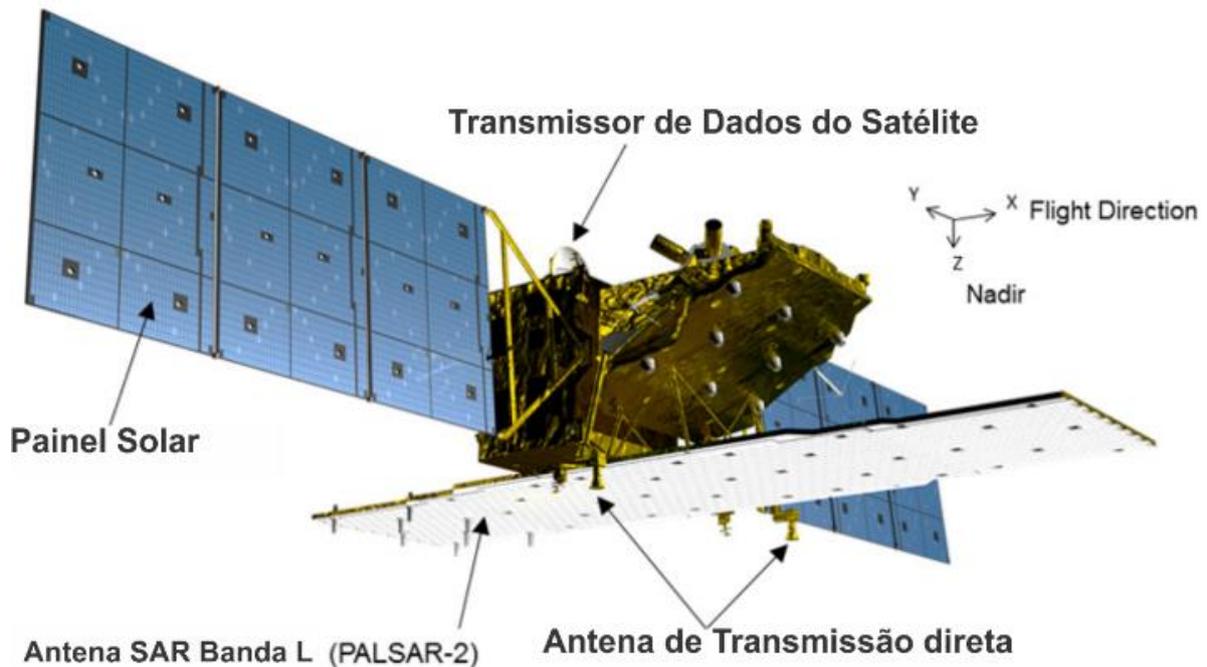


Figura 17. Esquema de aquisição de dados através de antenas do tipo SAR. Fonte: Agência de Exploração Aeroespacial do Japão, 2014.

A interpretação de imagens SAR baseia-se principalmente nas diferenças entre as propriedades dielétricas, como a presença de água no meio em questão, pois ao operar em faixas espectrais centimétricas, abre possibilidade de se obter imagens de uma área, independente de nebulosidade ou de iluminação natural (Henderson e Lewis, 1998). No Brasil o sistema de radar que adquiriu um dos maiores volumes de dados de radar no período 2006-2011 foi o Advanced Land Observing Satellite Phased Array L-band Synthetic

Aperture Radar (ALOS PALSAR), operando em uma faixa de 23 cm de comprimento, sendo conhecida como banda L (Igarashi, 2001), e a partir de 2013 deu lugar ao ALOS 2. Quanto maior o comprimento de onda, maior a capacidade de penetração dos sinais de radar no dossel ou em solos. Não existe uma banda espectral que seja melhor ou pior, dependendo do tipo de aplicação (Jensen, 2009).

Tabela 5. Principais comprimentos de onda e frequências utilizados pelos sistemas de Radar.

Banda	Comprimento de onda (cm)	Frequência (GHz)
Ku	1,67 – 2,24	18,0 – 12,5
X	2,24 – 3,38	12,5 – 8,0
C	3,9 – 7,75	8,0 – 4,0
S	7,75 – 15,0	4,0 – 2,0
L	15,0 – 30,0	2,0 – 1,0
P	30,0 – 100,0	1,0 – 0,3

Fonte: Jensen (2009).

Integração entre GPR e SAR

As abordagens de migração entre dados GPR e SAR são baseadas em equações de onda, aplicadas para objetos previamente conhecidos e enterrados. Estas equações têm sido amplamente utilizadas com sucesso no processamento de sinais sísmicos para exploração de petróleo por décadas (Gu et al., 2003).

Ao levar em consideração que os dois métodos se utilizam de ondas eletromagnéticas, alguns autores como Nazli e Sezgin (2011), trabalharam com GPR para transformar os dados obtidos em uma Imagem SAR. Através transformação inversa de Fourier 2D, os dados de domínio de tempo coletados em diversos pontos de observação foram transformados em domínio

espectral 2D, através de dois algoritmos: radar de abertura sintética Strip-map e métodos de subtração de fundo para dados GPR A-scan. Os resultados foram satisfatórios para o método SAR, que oferece melhor foco sobre a assinatura do alvo do que o método de subtração do sinal A-scan. Em um trabalho semelhante Baer et al. (2017), realizou uma integração entre as técnicas de Radar de Penetração no Solo (GPR) e Radar de Abertura Sintética (SAR), verificando a reflexão da superfície do solo e a propagação da onda no solo. Aplicando o princípio de Fermat e o operador Sober, foi feita uma otimização da imagem SAR dos dados GPR, enquanto a permissividade do solo foi estimada.

Mas para Baer et al. (2017), a combinação de técnicas comuns de GPR e SAR não é direta, devido ao comportamento diversificado de propagação das ondas eletromagnéticas no espaço livre e no solo, pois as diferentes velocidades de propagação, bem como os efeitos de reflexão na superfície do solo, influenciam os algoritmos de SAR negativamente. Negligenciar a permissividade do solo poderá causar uma superposição errônea das fases, fazendo com que as imagens de SAR pareçam borradas. Estudos semelhantes foram realizados por Gonzalez-Valdes et al. (2013), conseguindo caracterizar a rugosidade da superfície.

Em trabalhos posteriores de aplicação, foram realizados monitoramentos de zonas úmidas dentro do canal de uma usina hidrelétrica usando Radar de Abertura Sintética (SAR) e dados de radar de penetração no solo (GPR). O monitoramento baseado em SAR considerou a estimativa de umidade do solo e a detecção de umidade causada por vazamentos, utilizando descritores de Fourier, enquanto a interpretação automática de dados

baseada em GPR usou descritores de Fourier para detectar potenciais zonas úmidas dentro do canal. A partir dos dados obtidos foram comparados os momentos espectrais, os resultados mostraram que os dados de SAR podem ser usados para detectar vazamentos de água quando a superfície já está úmida, enquanto os dados GPR, obtidos no topo e nas laterais do canal, podem ser usados para determinar possíveis vazamento de água dentro do canal (Gleich, 2013).

Grandjean et al. (2003), fez um abordagem baseada na integração entre duas técnicas o Radar de Abertura Sintética aerotransportada (SAR) na frequência da banda L (1,2 GHz), capaz de produzir imagens de estruturas subsuperficiais de grande escala, e o Radar de Penetração no Solo (GPR) usado entre 500 e 900 MHz para sondar solos em escala local, da superfície até vários metros de profundidade. Este trabalho visou identificar paleodunas e paleossolos, no Egito e França, com a possibilidade de mapear grandes estruturas como estratificações cruzadas, devido ao ambiente de deposição. A profundidade de penetração do SAR é estimada invertendo um modelo de espalhamento simples, permitindo diagnosticar propriedades geométricas em subsuperfície, e as propriedades dielétricas foram determinadas pela análise de dados GPR. Com a combinação das técnicas foi possível detectar estruturas, além da profundidade de pacotes espessos de solo.

No trabalho de Grandjean et al. (2003), ele optou por realizar um perfil de 400 m de distância e 2,5m de largura, nos modos GPR e SAR, com incidência de 0° a 45° e abertura de 45° a 2°, cuja as respostas dielétricas para os modelos estão na Figura 18.

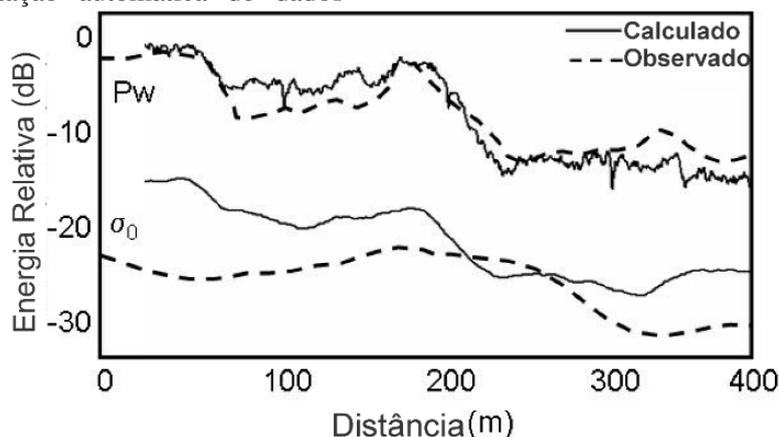


Figura 18. As curvas superior e inferior referem-se, respectivamente, às potências GPR e SAR. Fonte: Grandjean et al., 2003

Conclusão

Todas as citadas técnicas apresentam potencial para obtenção de informações pedológicas, mas necessitam do processamento adequado para se chegar a um resultado satisfatório. Da etapa de aquisição até o produto final (mapa), muitos passos podem interferir negativa ou positivamente. Uma má calibração de um equipamento, levar em consideração fatores irrelevantes ou uma aquisição mal elaborada podem interferir diretamente no resultado. Da mesma forma o uso correto dos equipamentos e processamentos adequados geram produtos mais próximos da realidade.

O mapeamento digital de solos pode ser integrado ou utilizar dados de outros métodos, de forma que esta ferramenta está em constante evolução, a sua base de dados internacional é extensa e continua se expandindo.

O mapeamento digital envolvendo métodos como SIG e sensoriamento remoto com uso de imagens de radar, tem gerado mapas com maior precisão. Mas ainda se faz necessária a confirmação de dados através da coleta de amostras em campo, descrição de perfis de solos e a análise de amostras em laboratório, pois a confirmação e calibração de equipamentos dependem de informações diretas, que apenas podem ser obtidas em campo.

Ferramentas como o Georadar e imagem de radar tem demonstrado um grande potencial para integrar o mapeamento de solos pois apresentam baixo custo e eficiência na aquisição de dados com baixa margem de erro. E, devido ao fato destas tecnologias empregarem ondas eletromagnética em diversos comprimentos, podem ser ajustadas para diferentes realidades.

A espectrorradiometria é um dado de baixo custo, fácil e rápida aquisição, e embora as composições pedológicas sejam multifásicas, a resposta espectral para cada elemento isoladamente não varia, permitindo uma parametrização de composições semelhantes. A base de dados construída através da ferramenta fornece suporte para que pesquisadores possam fazer

análises comparativas em qualquer parte do mundo.

O SAR é outra ferramenta com potencial de crescimento, pois com o avanço do poder de processamento dos computadores atuais, o método tem crescido cada vez mais, e a principal vantagem é a capacidade de penetração da onda de radar através da nebulosidade e da vegetação.

O mapeamento pedológico tem evoluído por conta do número crescente de ferramentas que dão suporte a esta ciência, mas a construção de um mapa que se aproxime da realidade vai depender da habilidade do pesquisador em escolher o (s) método (s) mais adequado a cada realidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UNB (Universidade de Brasília) que forneceu uma estrutura adequada para a realização da pesquisa, além da Capes, ICMBIO e CECAV, que tem trabalhado em parceria com os autores via Laboratório de Geografia Física da UNB, para a realização de diversos trabalhos.

Referências

- AFSHAR, A.; ABEDI, M.; NOROUZI, G.-H.; RIAHI, M.-A. 2015. Geophysical Investigation of Underground Water Content Zones Using Electrical Resistivity Tomography and Ground Penetrating Radar: A Case Study in Hesarak-Karaj, Iran. *Engineering Geology*, 196, 183–193. doi: 10.1016 / j.enggeo.2015.07.022
- ALGEO, J.; VAN DAM, R. L.; SLATER, L. 2016. GPR precoce: Early-Time GPR: A Method to Monitor Spatial Variations in Soil Water Content During Irrigation in Clay Soils.. *Vadose Zone Journal*, 15 (11), 0. doi: 10.2136 / vjz2016.03.0026
- ANNAN AP. 1992. Ground penetration radar workshop notes. *Sensors & Software*, Mississauga. Retrieved from.
- ARDEKANI, M. R. 2013. Off- and on-ground GPR techniques for field-scale soil moisture mapping. *Geoderma*. V. 200–201, P. 55–66.

- <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.010>.
- ARROUAYS, D. 2017. LAGACHERIE, P.; HARTEMINK, A. E. Digital soil mapping across the globe. **Geoderma Regional**, V. 9, P. 1–4,
- BAER, C.; GUTIERREZ, S.; JEBRAMCIK, J.; BAROWSKI, J.; VEGA, F.; ROLFES, I. 2017. Ground penetrating synthetic aperture radar imaging providing soil permittivity estimation. **IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest**, p. 1367–1370,
- BALLABIO, C.; PANAGOS, P.; LUGATO, E.; HUANG, J.H.; ORGIAZZI, A.; JONES, A.; FERNANDEZ-UGALDE, O.; BORRELLI, P.; MONTANARELLA, L. 2018. Copper distribution in European topsoils: an assessment based on LUCAS soil survey. **Sci. Total Environ.** 636, 282–298.
- BEN-DOR, E.; BANIN, A. 1995. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 59:364–372.
- BISWAS, A.; ZHANG, Y. 2018. Sampling Designs for Validating Digital Soil Maps: A Review. **Pedosphere**, v. 28, n. 1, p. 1–15.
- BORECKA, A.; HERZIG, J.; DURJASZ-RYBACKA, M. 2015. Ground Penetrating Radar Investigations of Landslides: A Case Study in a Landslide in Radziszów. **Studia Geotechnica et Mechanica**, v. 37, n. 3, p. 11-18 DOI: 10.1515/sgem- 2015-0028.
- BRODSKÝ, L.; KLEMENT A.; PENÍŽEK V.; KODEŠOVÁ R.; BORUVKA L. 2011. Building soil spectral library of the czech soils for quantitative digital soil mapping. **Soil and Water Research**, v. 6, n. 4, p. 165–172,
- BROWN D.J. 2007. Using a global VNIR soil-spectral library for local soil characterization and landscape modeling in a 2nd-order Uganda watershed. **Geoderma**, 140: 444–453.
- BROWN, D.J.; SHEPHERD, K.D.; WALSH, M.G.; MAYS, M.D. & REINSCH, T.G. 2006. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, 132:273-290.
- CARNEY, M. N.; JOHNSTON, W. M. 2016. A novel regression model from RGB image data to spectroradiometric correlates optimized for tooth colored shades. **JOURNAL OF DENTISTRY**. Vol: 51 Pág: 45-48.
- CASELLE, C., BONETTO, S., COMINA, C., & STOCCO, S. 2020. GPR surveys for the prevention of karst risk in underground gypsum quarries. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 95, 103137. doi:10.1016/j.tust.2019.103137
- CATHCART, J. M.; CAMPBELL R.; GREENWOOD S.; BOCK R. D.; MAURO B. 2004. Impact of soil and environmental processes on hyperspectral infrared signatures. **Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets IX**, v. 5415, p. 638,
- CATEN, A. TEN; DALMOLIN R. S. D.; MENDONÇA-SANTOS M DE L, GIASSON E. 2012. Mapeamento digital de classes de solos : características da abordagem brasileira. **Ciência Rural**. Santa Maria, v.42, n.11, nov, Pág:1989–1997.
- CEZAR, E.; NANNI, M.; DEMATTÊ, J.; CHICATI, M.; BERTI, R. 2013. Estimativa de atributos do solo por meio de espectrorradiometria difusa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 37 (4): 858-868, [Fecha de consulta: 16 de junho de 2019]. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180228128004>
- CEZAR, E., NANNI, M. R., GUERRERO, C., DA SILVA JUNIOR, C. A., CRUCIOL, L. G. T., CHICATI, M. L., & SILVA, G. F. C. 2019. Organic matter

- and sand estimates by spectroradiometry: Strategies for the development of models with applicability at a local scale. **Geoderma**, Vol: 340, Pag: 224–233. doi:10.1016/j.geoderma.2019.01.021
- CHANG, C.; LAIRD, D.A.; MAUSBACH, M.J. & HURBURGH JUNIOR, C.R. 2001. Near-infrared reflectance spectroscopy - principal components regression analyses of soil properties. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 65:480-490,
- CHANZY A.; TARUSSOV A.; JUDGE A.; BONN F. 1996. Soil water content determination using a digital ground-penetrating radar, **Soil Sci. Soc. Am. J.** 60 1318–1326.
- COLEMAN, T.L. & MONTGOMERY, O.L. 1987. Soil moisture, organic matter and iron content effect on the spectral characteristics of selected Vertisols and Alfisols in Alabama. *Photogr. Eng. Remote Sens.*, 53:1659-1663,
- DANIEL, K.W.; TRIPATHI, N.K. & HONDA, K. 2003. Artificial neural network analysis of laboratory and in situ spectra for the estimation of macronutrients. In: **Soils of Lop Buri** (Thailand). *Aust. J. Soil Res*, 41:47-59,
- DE BENEDETTO, D.; CASTRIGNANÒ, A.; SOLLITTO, D.; MODUGNO, F. 2010. Spatial relationship between clay content and geophysical data. **Clay Minerals** 45 (2) 197-207.
- DEMATTÊ, J. A. M., RAMIREZ-LOPEZ, L., MARQUES, K. P. P., & RODELLA, A. A. 2017. Chemometric soil analysis on the determination of specific bands for the detection of magnesium and potassium by spectroscopy. **Geoderma**, Vol: 288, Pág 8–22. doi:10.1016/j.geoderma.2016.11.013
- DEMATTÊ, J. A. M.; ALVES, M. R. ; TERRA, F. D. S.; BOSQUILIA, R. W. D.; FONGARO, C.T.; BARROS, P. P. D. S. 2016. É possível classificar a textura do solo usando um sensor localizado a 800 km da superfície ?. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol 40. P.
- DOI:
http://dx.doi.org/10.1590/18069657rbcS20150335.
- DEMATTÊ, J. A. M., DOTTO, A. C., PAIVA, A. F. S., SATO, M. V., DALMOLIN, R. S. D., DE ARAÚJO, M. DO S. B.; ELISÂNGELA B. DA SILVA; NANNI, M. R.; CATEN, A. TEN; NORONHA, N. C.; LACERDA, M. P. C.; JOSÉ COELHO DE ARAÚJO FILHO; RODNEI RIZZO; BELLINASSO H.; FRANCELINO, M. R.; SCHAEFER, C. E. G. R.; LUIZ E. VICENTE; UEMESON J. DOS SANTOS; SAMPAIO, E. V. S. B.; MENEZES, R. S. C.; SOUZA, J. J. L. L. DE; ABRAHÃO, W. A. P.; COELHO, R. M.; GREGO, C. R.; LANI, J. L.; FERNANDES, A. R.; GONÇALVES, D. A. M.; SILVA, S. H. G.; MENEZES, M. D. DE; CURI, N.; COUTO, E. G.; ANJOS, L. H. C.; CEDDIA, M. B.; PINHEIRO, É. F. M.; GRUNWALD S.; VASQUES, G. M.; MARQUES. J. J.; SILVA, A. J. DA; BARRETO, M. C. V.; NÓBREGA, G. N.; SOUZA, M. Z. DA SILVA; SARA F. DE; VALLADARES, G. S.; VIANA, J. H. M.; TERRA, F. S.; HORÁK-TERRA, I.; FIORIO, P. R.; SILVA, R. C.; FRADE, E. F. JÚNIOR; LIMA R. H. C.; ALBA, J. M. F.; SOUZA, V. S. DE JUNIOR; BREFI, L. M. S.; RUIVO M. L. P.; FERREIRA, T. O.; BRAIT, M. A.; CAETANO, N. R.; BRINGHENTI I.; MENDES, W. S.; SAFANELLI, J. L.; GUIMARÃES, C. C. B.; POPPIEL, R. R.; SOUZA, A. B.; QUESADA, C. A.; COUTO, H. T. Z. **2019**. The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): A general view, application and challenges. **Geoderma**, v. 354, n. August, p. 113793.
- EPIPHANIO, J. C. N. 1983. Efeito do ângulo de observação e da rugosidade superficial no comportamento espectral

- de solos sob condições hídricas temporalmente variáveis. São Jose dos Campos: **INPE**, 52 p.
- EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R.; VALERIANO, M.M.; OLIVEIRA, J.B. 1992. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 131p. (INPE-5424-PRP-172).
- FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, J.C.N.; VALERIANO, M.M.; OLIVEIRA, J.B. 1996. Comportamento espectral (450-2.450 nm) de solos tropicais de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.467-474,
- FRUNEAU B.; ACHACHE, J.; DELACOURT, C. 1996. "Observation and modeling of the SaintEtienne-de-Tinee landslide using SAR interferometry". **Tectophysics** 265, pp. 181– 190.
- GLEICH, D. 2013. Detection of wet zones within a hydro-power plant's canal using SAR and GPR data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 6, n. 4, p. 1864–1878,
- GONZALEZ-VALDES, B.; MARTINEZ-LORENZO, J. A.; RAPPAPORT, C. M. 2013. Dual band SAR processing for low dielectric contrast buried IED detection. **IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)**, p. 1080–1081.
- GU, K.; WANG, G.; LI, J. 2003. Migration Based SAR Imaging for Ground Penetrating Radar Systems. **Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery X**. doi:10.1117/12.487135
- HARRISON, L.; MICHALSKY, J.; BERNDT, J. 1994. "Automated multifilter rotating shadow-band radiometer: an instrument for optical depth and radiation measurements," *Appl. Opt.* 33(22), 5118–5125.
- HARTEMINK, A. E. 2016. The definition of soil since the early 1800s. **Advances in Agronomy**, Vol: 137, Pág: 73–126. doi:10.1016/bs.agron.2015.12.001
- HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. 1998. **Principles and Applications of Imaging Radar**. Manual of Remote Sensing, Nova Iorque: John Wiley & Sons, 3a ed., v. 2, 866 p.
- IGARASHI, T. 2001.ALOS mission requirements and specifications. **Advances in Space Research**, v. 28, n. 1, p. 127-131.
- ISLAM, K.; SINGH, B.; SCHWENKE, G.; MCBRATNEY, A. 2004.Evaluation of vertosol soil fertility using ultra-violet, visible and near-infrared reflectance spectroscopy. In: **SUPERSOIL**, 3. 2004, Sydney. Proceedings... Sydney, University of Sydney.
- JENSEN, J. R. 2009. **Sensoriamento Remoto do Ambiente**. Uma Perspectiva em Recursos Terrestres. Tradução: José Carlos Neves Epiphânio et al. São José dos Campos: Parentese, 585 p.
- JOL, H.; BRISTOW, C.; 2003. GPR in sediments: Advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. **Geological Society Special Publication**, 211 pp. 9-27. 10.1144/GSL.SP.2001.211.01.02.
- KARIM, M. N. A.; JAMLOS, M. A.; IBRAHIM, S. Z.; JAMLOS, M. F.; LEE, Y. S. 2019. Geological Effect on GPR System Due to Soil Properties in Malaysia. **International Journal Of Integrated Engineering**. Vol: 11, Ed: 3, Pág: 313-320.
- KINGSLEY, S.; QUEGAN, S. 1999. Understanding Radar Systems, **SciTech Publishing**, Raleigh, NC,
- KHOSRAVI, M.R., SAMADI, S. 2019. Data compression in ViSAR sensor networks using non-linear adaptive weighting. **J Wireless Com Network**, vol: 2019, N° 264 doi:10.1186/s13638-019-1577-z

- LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A.B.; VOLTZ, M.. Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. In: LAGACHERIE, P. et al. (Ed.). **Digital soil mapping: an introductory perspective**. Amsterdam: Elsevier, 2007. p.3-24.
- LAMBOT, S., SLOB, E., CHAVARRO, D., LUBCZYNSKI, M., VEREECKEN, H. 2008. Measuring soil surface water content in irrigated areas of southern Tunisia using full-waveform inversion of proximal GPR data. **NEAR Surf. Geophys.** 6, 403–410.
- LAMINE, S.; PETROPOULOS, G.; BREWER, P.; BACHARI, N. E. I.; SRIVASTAVA, P.; MANEVSKI, K.; KALAITZIDIS, C.; MACKLIN, M. 2019. Heavy Metal Soil Contamination Detection Using Combined Geochemistry and Field Spectroradiometry in the United Kingdom. **Sensors**. Vol: 19(4), 762. doi:10.3390/s19040762
- LIU, B.; REN, Y.; LIU, H.; XU, H.; WANG, Z.; COHN, A. G.; JIANG, P. 2019. Deep Learning-Based Ground Penetrating Radar Data Inversion for Tunnel Lining. **IEEE**. Vol:2, Pag: 1-15.
- LIU, X. B.; CHEN, J.; CUI, X. H.; LIU, Q. X.; CAO, X.; CHEN, X. H. 2017. Measurement of soil water content using ground-penetrating radar: a review of current methods. **INTERNATIONAL JOURNAL OF DIGITAL EARTH** Vol: 12 Ed. 1 P. 95-118 DOI: 10.1080/17538947.2017.1412520
- LIMA, S. F. S. 2011. Iniciação em sensoriamento remoto. **Educar em Revista**, n. 40, p. 225–227.
- MCBRATNEY, A.B., MENDONÇA SANTOS, MDL, MINASNY, B., 2003. On digital soil mapping. **Geoderma**. vol 117 (1–2), P. 3–52.
- MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. 2001. orgs. **Sensoriamento remoto: Reflectância dos alvos naturais**. Brasília, UnB/Embrapa Cerrados, 262p.
- MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. 2016. Digital soil mapping: A brief history and some lessons. **Geoderma**, v. 264, p. 301–311.
- MINET, J., WAHYUDI, A., BOGAERT, P., VANCLOOSTER, M., LAMBOT, S. 2011. Mapping shallow soil moisture profiles at the field scale using full-waveform inversion of ground penetrating radar data. **Geoderma**. Vol 161, P. 225–237. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.023>.
- MINET, J., BOGAERT, P., VANCLOOSTER, M., LAMBOT, S. 2012. Validation of ground penetrating radar full-waveform inversion for field scale soil moisture mapping. **J. Hydrol.** 424–425, 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.034>.
- NANNI, M.R. & DEMATTÊ, J. A. M. 2006. Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 70:393-407.
- NAZLI, H.; SEZGIN, M. 2011. Effects of different soil types on strip-map GPR SAR images. **Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XVI**, v. 8017, p. 80170Y.
- NEAL, A. 2004. Ground Penetrating Radar and Its Use in Sedimentology: Principle, Problem and Progress. **Earth Science Reviews**, v. 66, p. 261-330. Doi: 10.1016/j.earscirev.2004.01.004.
- NUNES, J. G. S.; UAGODA, R.; CALDEIRA, D.; BRAGA, L. M.; HUSSAIN, Y. ; CARVAJAL, H. M. 2019. Aplicação do gpr para análise e diferenciação entre materiais aluvionares e coluvionares, embasadas em observações diretas, no Vale do Ribeirão Contagem - Distrito Federal (Brasil). **Revista Brasileira De Geomorfologia**,

- Vol: 20 Ed: 2 Pág: 217-238, DOI: 10.20502/rbg.v20i2.1382
- PRICE, J. C. 1994. How unique are spectral signatures? **Remote Sensing of Environment**, v. 49, n. 3, p. 181–186.
- PRINCE, M.; ROY, A.; ROYER, A.; LANGLOIS, A. 2019. Timing and spatial variability of fall soil freezing in boreal forest and its effect on SMAP L-band radiometer measurements. **REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT**. Vol: 231.
- RAMOS D.P. 2003. Desafios da Pedologia Brasileira frente ao novo milênio - (CNPQ/EMBRAPA). In: Simpósio do XXIX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Ribeirão Preto, SP, 2003. **Anais do Solo**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo,- 9p.
- RODRIGUES, M., NANNI, M. R., CEZAR, E., ABRANTES DOS SANTOS, G. L. A., SILVEIRA REIS, A., & DE OLIVEIRA, K. M. Evaluation of the use of spectroradiometry for the determination of soil exchangeable ions after the application of mining coproducts. **Applied Spectroscopy Reviews**, 2019. doi:10.1080/05704928.2019.1683569
- ROYLE J A, NYCHKA D. 1998. An algorithm for the construction of spatial coverage designs with implementation in SPLUS. **Comput Geosci**. V. 24, p. 479–488.
- SANCHEZ, P. A.; AHAMED, S.; CARRÉ, F.; HARTEMINK, A. E.; HEMPE, J.; HUISING J.; LAGACHERIE P.; MCBRATNEY A. B.; MCKENZIE N. J.; SANTOS M. L. M.; MINASNY B.; MONTANARELLA L.; OKOTH P.; PALM C. A.; SACHS J. D.; SHEPHERD K. D.; VÅGEN T. G.; VANLAUWE B.; WALSH M. G.; WINOWIECKI L. A.; ZHANG G. L. 2009. “Digital soil map of the world”. **Science** 325(5941):680–81.
- SHEPHERD, K.D.; WALSH, M.G. 2002. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 66:988-998.
- SHIMADA, M.; ISOGUCHI, O.; TADONO, T.; ISONO, K. 2009. Pulsar Radiometric and Geometric Calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 47 3915-3932.
- SELIGE T., BOHNER J, SCHMIDHALTER U. 2006. High resolution topsoil mapping using hyperspectral image and field data in multivariate regression modeling procedures. **Geoderma**, 136: 235–244.
- SILVA, B. A.; MARTINS V. M.; HAYAWAKA E. H.; MACEDO R. S. 2018. Mapeamento Digital De Solos E Os Atributos Topográficos Das Vertentes No Alto Curso Da Sub-Bacia Hidrográfica Do Córrego Quatro Pontes, Pr–Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 4.
- SLATER, L.; COMAS, X. 2009. The contribution of ground penetrating radar to water resource research. In: Jol, H.M. (Ed.), **Ground Penetrating Radar: Theory and Applications**. Elsevier, Amsterdam, pp. 203–246.
- SOUZA, E.; FERNANDES FILHO, E.I.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BATJES, N.H.; SANTOS, G.R.; PONTES, L.M. 2016. Pedotransfer functions to estimate bulk density from soil properties and environmental covariates: Rio Doce basin. **Scientia Agricola** vol: 73, Pag: 525-534,
- STONER, E. R.; BAUMGARDNER, M. F. 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils. **Soil Science Society of America**. Journal, Madison, v.45, p.1161-1165,
- STENBERG, B.; JONSSON, A.; BORJESSON, T. 2002. Near infrared technology for soil analysis with implications for precision agriculture. In:

- NEAR INFRARED SPECTROSCOPY: **PROCEEDINGS OF THE 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE**, Chichester, Anais...Chichester, NIR Publications, 2002. p.279-284.
- STENBERG, B.; VISCARRA ROSSEL, R.A.; MOUAZEN, A.M.; WETTERLIND, J. 2010. Visible and near infrared spectroscopy. In: **Soil Science**. Adv. Agron., 107:164-206.
- TAGHIZADEH - MEHRJARDI, R.; NABIOLLAHI, K.; KERRY, R. Digital mapping of soil organic carbon at multiple depths using different data mining techniques in Baneh region, Iran. **Geoderma**, v. 266, p. 98–110, 2016.
- ULABY, F.T.; MOORE, R.K. & FUNG, A.K. 1981. Microwave remote sensing - Active and passive. Washington, D.C., **Artech House**, v.1. 456p.
- VALERIANO, M.M.; EIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R.; OLIVEIRA, J.B. 1995. Bidirectional reflectance of tropical soils. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.16, n.1, p.113 – 128.
- VAN DAM R.L. 2012. Landform characterization using 62 geophysics-Recent advances, applications, and emerging tools. *Geomorphology*, Doi: 137:57–73. 63.
- VISCARRA ROSSEL, R. A.; BEHRENS, T.; BEN-DOR, E.; BROWN, D. J.; DEMATTÊ, J. A. M.; SHEPHERD, K. D.; SHI, B. STENBERG, A. STEVENS, V. ADAMCHUK, H. AÏCHI, B. G. BARTHÈS, H. M. BARTHOLOMEUS, A. D. BAYER, M. BERNOUX, K. BÖTTCHER, L. BRODSKÝ, C. W. DU, A. CHAPPELL, Y. FOUAD, V. GENOT, C. GOMEZ, S. GRUNWALD, A. GUBLER, C. GUERRERO, C. B. HEDLEY, M. KNADEL, H. J. M. MORRÁS, M. NOCITA, L. RAMIREZ-LOPEZ, P. ROUDIER, E. M. RUFAS. CAMPOS, P. SANBORN, V. M. SELBITTO, K. A. SUDDUTH, B. G. RAWLINS, C. WALTER, L. A. WINOWIECKI, S. Y. HONG, E W. J. 2016. A global spectral library to characterize the world's soil. **Earth-Science Reviews**, v. 155, n. February, p. 198–230.
- VISCARRA ROSSEL R. 2008. The Soil Spectroscopy Group and the development of a global soil spectral library. **Pedometron, The Newsletter of the Pedometrics Commission of the IUSS**, Issue 25.
- VISCARRA ROSSEL R.A., WALVOORT D.J.J., MCBRATNEY A.B., JANIK L.J., SKJEMSTAD J.O. 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, 131: 59–75.
- WOOD, J. 2009. Overview of software packages used in geomorphometry. In: HENGL, T.; REUTER, H.I. **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications**. Amsterdam: Elsevier, Cap.10. p.257-267.
- WU, K.; RODRIGUEZ, G. A.; ZAJC, M.; JACQUEMIN, E.; CLEMENT, M.; DE COSTER, A.; LAMBOT, S. 2019. A new drone-borne GPR for soil moisture mapping. **REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT** Vol: 235 N°: 111456 DOI: 10.1016/j.rse.2019.111456
- YOUNG, I.M.; CRAWFORD, J.W. 2004. Interaction sand self-organization in the soil- microbe complex. **Science** 304,1634–1637.
- ZAJÍCOVÁ, K.; CHUMAN, T. 2019. Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review. **Geoderma**, v. 343, n. February, p. 116–129,
- ZHANG, X. L.; DAO, L. G.; ZHANG, C. S.; MORRISON, L.; HONG, B.; ZHANG, H. X.; GAN, Y. M. 2018. Mapping the spatial distribution of soil depth in a grassland ecosystem with the aid of ground penetrating radar and GIS (Northwestern Sichuan, China). **GRASSLAND SCIENCE** Edição 64, Pag: 217-225.

[RBGF] Decisão editorial Caixa de entrada x



Dra. Josiclêda Domiciano Galvêncio <josicleda.galvencio@ufpe.br>
para eu, Rogério ▾

Voce José Gustavo da Silva Nunes:

Foi tomada uma decisão sobre o artigo submetido à Revista Brasileira de Geografia Física, "Análise da eficiência dos métodos indiretos para o mapeamento de solos frente às técnicas diretas, e suas possíveis associações: Uma revisão metodológica."

A decisão é: aceitar com correções. Seu artigo possui potencial de ser publicado na RBGF. Precisas atender as seguintes exigências

- 1 - Colocar o ORCID de todos os autores no sistema da RBGF.
 - 2 -30% das referências citadas precisam ser dos últimos cinco anos
 - 3- Evitar citações de anais e livros.
 - 4 – Melhorar a discussão do seu artigo com mais citações e comparações de publicações da literatura atualizada.
 - 5 – Segue em anexo artigo modelo e normas da RBGF para que ajustes seu artigo de acordo com as normas. Atentar para as citações e referências.
- Receberás um e-mail da pagseguro solicitando o pagamento da taa de publicação. Os últimos artigos aceitos em 2019 pagarão taxas pelo pagseguro devido o fechamento do ano fiscal.

Dra. Josiclêda Domiciano Galvêncio
Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Ciências Geográficas,
Recife-PE
Fone 55 + 81 21267375
Fax 55 + 81 21268275
josicleda.galvencio@ufpe.br
Profa. Dra. Josiclêda Domiciano Galvêncio
Josiclêda Domiciano Galvêncio
Editora Chefe da Revista Brasileira de Geografia Física - RBGF
Editor-in-Chief of Revista Brasileira de Geografia Física - RBGF
<http://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>

CAPÍTULO 3 (ARTIGOS DE RESULTADOS)

O uso do Georadar para estudo da Catena em ambiente cárstico da APA Nascentes do Rio Vermelho, Mambai-Go.

Resumo

Uma Catena é uma sequência de solos formados ao longo de uma encosta, para estudos detalhados deste tipo de topossequência deve-se levar em consideração uma série de fatores como o material de origem, o grau de declividade, a quantidade de precipitação, o nível freático, o tempo de permanência da água no sistema e o tipo de ambiente. Em áreas cársticas deve-se levar em consideração fatores exclusivos como zonas locais de alta permeabilidade, que levam a outros problemas nestes ambientes. Para o desenvolvimento desta pesquisa foram realizadas análises de campo para a descrição geomorfológica, incluindo estudos da paisagem, geológicos e pedológicos. Posteriormente foram realizados perfis de GPR com antena de 400 MHZ, para análise do comportamento, desenvolvimento e profundidade do solo, em ambiente cárstico, e de rochas sedimentares fluvioeólico. As seções de GPR conseguiram demonstrar com clareza os contatos entre diferentes litologias, demarcando a transição entre os materiais pedológicos, geológicos e estruturas cársticas, em áreas com inclinações diversas.

Palavras-chaves: GPR; Solo; Carste; Catena; Geomorfologia.

The use of Georadar for the study of Catena in the artistic environment of APA Nascentes do Rio Vermelho, Mambai-Go

Abstract

A Catena is a sequence of soils formed along a slope. For detailed studies of this type of toposequence, a number of factors must be taken into account, such as the source material, the degree of slope, the amount of precipitation, the water table., the time the water remains in the system and the type of environment. In karst areas, exclusive factors such as local high permeability zones must be taken into account, which lead to other problems in these environments. For the development of this research, field analyzes were carried out for the geomorphological description, including landscape, geological and pedological studies. Subsequently, GPR profiles were made with a 400 MHZ antenna, to analyze the behavior, development and depth of the soil, in a karst environment, and of fluvioeolic sedimentary rocks. The GPR sections were able to clearly demonstrate the contacts between different lithologies, demarcating the transition between the pedological, geological materials and karst structures, in areas with different slopes.

Keywords: GPR; Soil; Karst; Catena; Geomorphology.

Introdução

Uma catena é uma sequência de solos ao longo de uma encosta, desde o cume até o sopé. A variação das características do solo observada em uma catena ocorrem principalmente devido à topografia e sua influência no movimento de sedimentos e água. O movimento da água subterrânea permite uma previsibilidade de fatores como cor, acúmulo de matéria orgânica e ambientes de oxirredução (HONEYCUTT et al., 1990).

O levantamento pedológico tradicional, sob muitos aspectos, é um método evasivo e destrutivo, pois depende da abertura de trincheiras, como também da coleta de solo através de trado ou sondagem, e este tipo de estudo é pontual, se restringindo à área na qual ocorre a descrição ou ensaio do solo estudado, e por esta razão tem se utilizado de métodos geofísicos para este tipo de estudo (NOVAKOVA et al., 2013).

A zona denominada epicarste, segundo Ford e Williams (1989), abrange o horizonte superior da rocha carbonática, sendo a interface rocha/solo, onde a frente de intemperismo está atuando na formação e desenvolvimento do solo, podendo apresentar fissuras alargada por processos de carstificação, por onde a água que entra no sistema é drenada, dificultando a retenção desta pelo solo. Os solos que recobrem rochas calcárias e dolomíticas são compostos por argila avermelhada, normalmente eles serão classificados como Neossolos Litólicos, Cambissolos, Luvisolos, Nitossolos e Vertissolos háplicos (Cromico). As taxas de dissolução da calcita na epicarste são altas, podendo chegar a 0.1cm/ano (WHITE, 1988).

Os ambientes cársticos, que se formam devido a dissolução da calcita e dolomita presente em rochas carbonáticas, correspondem a cerca 20% do total da superfície do planeta, livre de gelo (FORD & WILLIAMS, 1989), estes ambientes apresentam particularidades em relação a outros tipos de depósitos sedimentares, como tendência para desenvolver zonas locais de alta permeabilidade causando problemas que incluem a fuga de água subterrânea, resultando em escassez e baixa previsibilidade de abastecimento de água subterrânea, escassez de fluxos de superfície, instabilidade do solo para fins de fundação, vazamento de reservatórios de superfície e ambientes de eliminação de resíduos insatisfatórios (LEGRAND, 1983).

O emprego de novas tecnologias pode auxiliar e reduzir o tempo gasto na identificação e caracterização de solos, entre estes novos métodos destaca-se o Georadar (CASELLE, et al., 2020), de forma que pesquisas com esta tecnologia produziram resultados diversos, dentre os quais estimar a densidade dos solos e conteúdo de água presente no meio (BORECKA et al., 2015), mudanças de propriedades físicas de sedimentos em encostas (NUNES et al., 2019), e variabilidade espacial de horizontes (KARIM et al., 2019).

O GPR (Ground Penetration Radar) ou Georadar, tem se apresentado na última década como um método geofísico eficaz na aquisição de dados em pouca profundidade (até 60m), mas o emprego de ondas eletromagnéticas para o mapeamento de discontinuidades elétricas em subsuperfície não é recente, tendo W. Stern já na década de 1920, se utilizado do método para mensuração de camadas de geleiras (OLHOEFT, 1986). Mas a popularização do método veio a partir do uso do Georadar para estudo de grandes placas de geleiras que se desprenderam na Groelândia na década de 1960, com a missão Apolo á Lua na década de 1970, sendo um dos primeiros usos para estudos de rochas e sedimentos (ULRIKSEN, 1982).

O Georadar conta com diversos tipos de antenas disponíveis no mercado, as mais usuais são as que apresentam um conjunto de antenas, transmissora e receptora, do tipo dipolar que pode ser blindada ou não, e que possui polarização preferencialmente linear, ou seja, possui o vetor de campo elétrico principal alinhado ao eixo da antena (SMITH, 1984). E através do comportamento (da reflexão) da energia no meio em questão, é capaz de identificar alvos (objetos soterrados) e variações composicionais na direção vertical conforme ilustrado na Figura 19 (estratigrafia de solos e rochas) (VAN DAM, 2012).

A aquisição de dados feita com o uso do Georadar pode ser feita de três modos, o perfil “Commom Offset”, sondagens de velocidade e a trans-iluminação ou tomografia. Segundo

Porsani (1999), para a aquisição dos perfis de reflexão é necessário observar a frequência da antena, a abertura da janela temporal a amostragem espacial, a localização e orientação do perfil, além do número de amostras por traços.

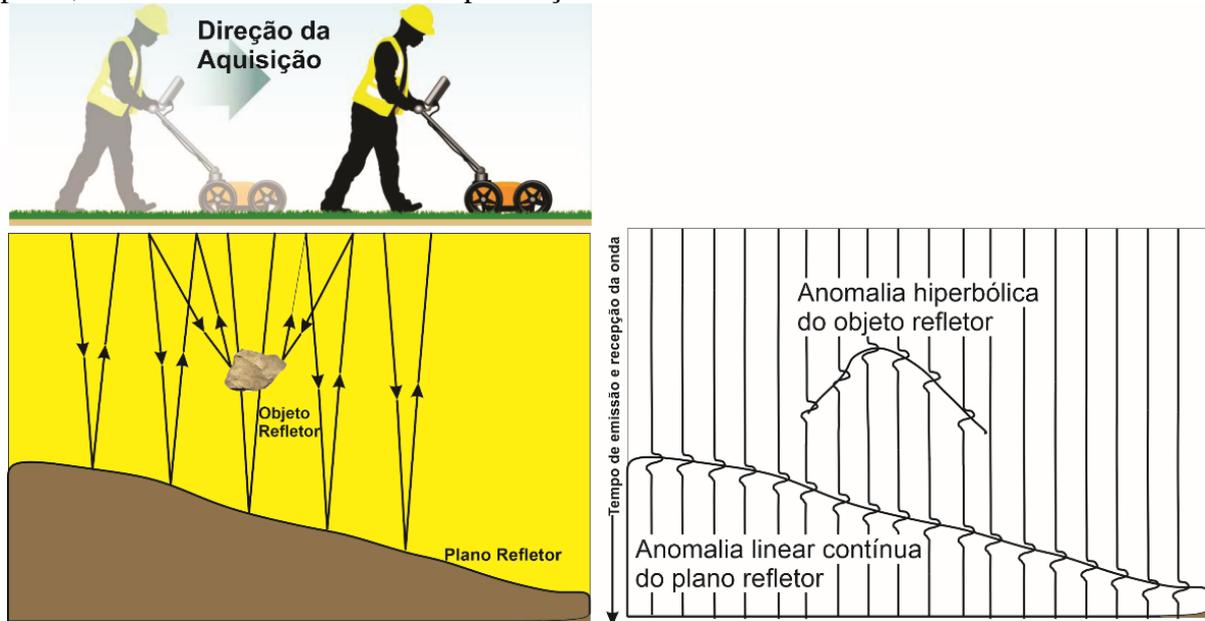


Figura 19. Aplicação do método GPR.

As ondas de rádio empregadas apresentam frequência entre 10 MHz e 2,6 GHz, obtendo informações relacionadas à subsuperfície, através da mensuração da permissividade dielétrica do solo. A penetração depende também do meio material, podendo variar de 5 a 60 metros, em relação inversamente proporcional à resolução da imagem produzida no radargrama, que pode variar de 0,5 a 200 centímetros (JOL & BRISTOW, 2003).

A possibilidade de repetição do método (GPR) para um mesmo perfil de solo, tanto para a validação de resultados, quanto para a correção de erros que possam ocorrer durante a aquisição, é outro fator de vantagem desta ferramenta não destrutiva, e de fácil execução (ZAJÍCOVÁ & CHUMAN, 2019).

Para gerar uma seção de GPR (ou Radargrama para o caso da superfície versus o tempo de viagem do pulso) é necessário realizar um processamento dos dados adquiridos em campo. O processamento sempre é iniciado com a correção do tempo zero, seguida por filtragem de dados e aplicações de ganhos, além das funções de migração (ANNAN, 1993). A ferramenta Georadar apresenta seus dados como uma resposta da propagação das ondas eletromagnéticas na forma de imageamento de representação de discontinuidades elétricas, frente a propagação e reflexão das ondas que são identificadas em um imageamento, no qual é feito uma identificação de padrões representativos destas discontinuidades, na forma de agrupamento de respostas associadas a um padrão de reflexão, correlacionado com o alvo a ser identificado. A técnica é baseada no coeficiente de reflexão da superfície, e não no tempo de transmissão do meio (SLATER & COMAS, 2009).

No que se refere à investigação da profundidade dos solos, o Georadar já é considerado uma ferramenta com eficiência comprovada. Alguns trabalhos como o de Zhang et al (2018), que investigou pacotes pedológicos na província de Sichuan, na China, em uma grade com 10 Km de espaçamento entre uma linha e outra, demonstram que o Georadar é capaz de obter com precisão e rapidez a profundidade do solo. Os dados foram associados à geoestatística, sendo

indiferentes à topografia do terreno pesquisado, obtendo uma diferença de apenas 3cm em média entre os dados diretos e indiretos.

O solo é constituído por diferentes fases (sólida, líquida e gasosa), características que definem a permissividade dielétrica, que será proporcional a contribuição de cada uma destas fases. Salat e Junge (2008) demonstraram uma correlação linear entre a permissividade dielétrica e a densidade de massa seca de um solo, indicando que a permissividade de solos secos depende fortemente de sua porosidade e compactação. Segundo os autores, a compactação do solo diminui a porosidade e, conseqüentemente a fase gasosa do sistema, aumentando a permissividade dielétrica.

A variação da permissividade dielétrica do solo tem sido objeto de estudo de diversos autores, como Cassidy (2009), que chegou à conclusão que a composição mineral pode afetar diretamente este fator. Um exemplo é a pesquisa de Salat e Junge (2008), na qual conseguiram comprovar que a presença de quartzo e/ou calcita no solo acarreta no aumento da permissividade. O aumento de matéria orgânica no perfil pedológico diminui a densidade do solo e conseqüentemente a permissividade.

Ao se utilizar Georadar para estudos pedológicos deve-se levar em consideração a quantidade de água presente no sistema, pois segundo Borecka et al (2015), a saturação da água do solo está diretamente associada à alta atenuação do sinal da antena, o que reduz consideravelmente a faixa real de profundidade alcançada pela onda eletromagnética, efeito semelhante ao provocado pela presença de argila no solo. Mas apesar do efeito citado, De Benedetto et al (2010), não conseguiram um resultado positivo com o uso do Georadar para mensuração de argila presente no solo.

Considerando que o solo é multifásico, a água deste sistema poderá apresentar diferentes composições em horizontes distintos. A fase líquida não apresentará quebras contínuas, mas sim uma variação gradual vertical, um exemplo desta hipótese seria um mesmo sistema pedológico contendo a água capilar e a água adsorvida na região de uma superfície freática. E com variações composicionais diferentes (saturação ou não em alguns elementos como sais e óxidos), tem-se também variações na permissividade da onda (Faize et al., 2019).

O Georadar já foi utilizado para investigar a distribuição de cobre (Cu) em solos de países da União Europeia. Ao se associar krigagem com o mapear a concentração de cobre no solo superficial, A metodologia se provou eficiente na previsibilidade da concentração de Cu (Ballabio et al., 2018).

Annan (2007), no livro American Society for Testing and Materials, afirma que a água é a substância com maior permissividade presente no solo e quando apresenta alta concentração no meio em questão poderá influenciar a permissividade de outros materiais, o autor diz que esta característica permite fazer estimativas da quantidade de água presente no solo. No entanto, Thomas et al. (2018) considera que a área superficial específica de solos argilosos é elevada, o que pode acarretar em diminuição da permissividade se o teor de água for elevado neste tipo de solo, e isso quando não houver perdas de condutividade devido a presença de partículas negativas que favorecem as trocas catiônicas. A relação entre a permissividade e a fração do solo é demonstrado na Figura 20, para solo com alto teor de caulinita.

$\epsilon - \sigma$ (Textura do solo, temperatura, 1,5 GHz)

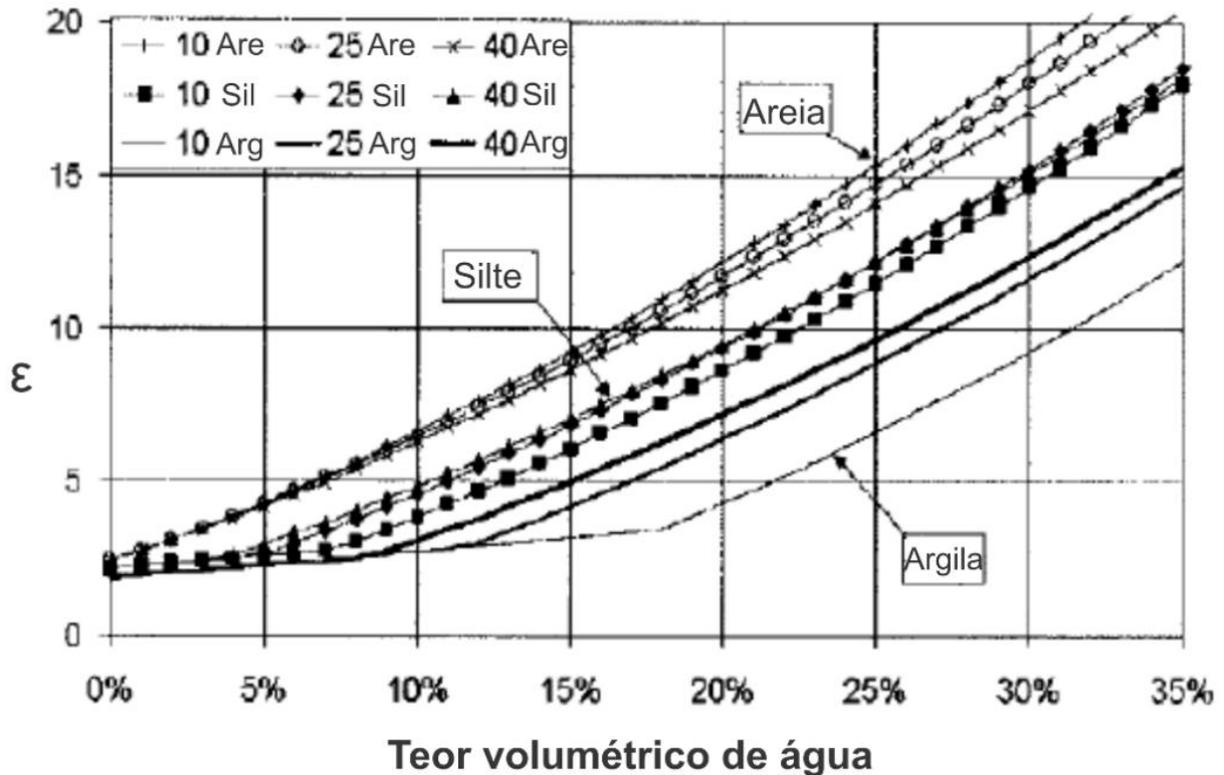


Figura 20. Variação da permissividade relativa com o aumento do teor de água em um solo com alto teor de caulinita. Fonte: Thomas et al. (2006).

Chanzy et al (1996), demonstrou que o erro para a determinação da umidade na camada superficial (10 a 20cm), foi de no máximo $0,046 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Através da antena de 200 MHz foram mensurados valores de tensão, registrados pelo receptor durante 200 ns. De forma que, para análise dos resultados foram verificados traços de solo seco em contraposição aos traços de solo úmido, comparando ondas entre 0 e 10ns com ondas entre 25 e 45 ns, que representam profundidades distintas. Os valores de picos das ondas eletromagnéticas, obtidos entre 65 e 75 MHz, são considerados traços do GPR relacionados a umidade segundo as teorias de Fourier. Outros trabalhos fizeram estimativas da umidade do solo utilizando-se do GPR (ARDEKANI, 2013; LAMBOT et al., 2008; MINET et al., 2012, MINET et al. 2011)

Métodos para mensurar a quantidade de água no solo a partir do uso de Georadar com base na inversão de forma da onda também tem se provado eficiente. Para isso foram realizadas análises de velocidade do sinal eletromagnético, das reflexões e do comportamento das ondas, com ênfase nos horizontes orgânicos e detecção de raízes de árvores (Zajícová e Chuman, 2019)

Para uma descrição detalhada da paisagem o GPR pode ser útil na análise morfológica, e este estudo e descrições locais poderão ser extrapoladas para além de seus limites, com a devida análise de zonas homologas. Este tipo de estudo pode ser feito utilizando-se de modelos digitais de elevação (MDT), para através de fatores topográficos, aplicar informações obtidas com o GPR.

Materiais e Métodos

Área de Estudo

A APA NRV compreende uma área de 176.324,33 hectares, localizada no município de Mambaí - GO, na divisa com o estado da Bahia, a uma distância de 509 Km de Goiânia e 301, delimitado pela escarpa da Serra Geral de Goiás. A APA é uma unidade de conservação de uso sustentável criada em 2001, com a finalidade de proteger e conservar o patrimônio espeleológico e garantir a manutenção dos recursos hídricos e solos da região.

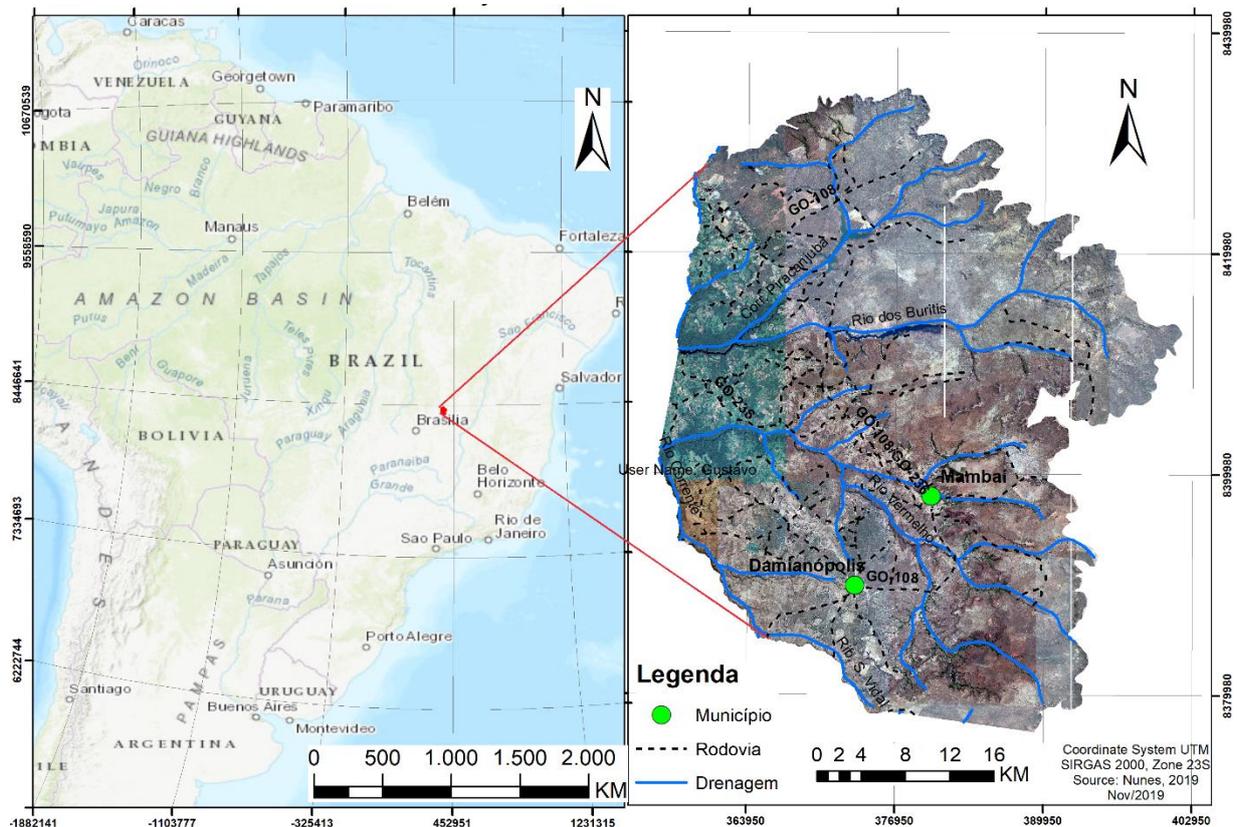


Figura 21. Mapa de localização da APA NRV.

A APA apresenta características físicas de clima tropical úmido, com duas estações bem definidas, sendo o verão quente e úmido e, inverno frio e seco. A área está compreendida na Bacia Hidrográfica do Rio Corrente, apresentando duas drenagens principais, Rio Vermelho na porção sul, e o Rio Buritis na porção norte.

A vegetação dominante é o cerrado, porém em áreas de domínio dos carbonatos se apresenta o Cerrado Denso, já nas porções dos arenitos observa-se a presença do Cerrado Típico. O contexto geomorfológico foi descrito por Cherem e Varajão (2014), apresentando duas compartimentações separadas por uma cuesta. A porção superior (Chapadão Central) é um remanescente da superfície Sulamericana representada pelos arenitos do Grupo Urucuia, apresentando sedimentos siliciclásticos inconsolidados, no sopé da cuesta, são observados depósitos colúvio-eluvionares predominantemente arenosos sendo que a maior contribuição para os colúvios são provenientes da formação Serra das Araras, já a Formação Posse, estratigraficamente abaixo, contribui com a maior parte dos sedimentos, e ambas formações pertencentes ao Grupo Urucuia, sofrem erosão desde o período Cenozoico. Mais a oeste na porção inferior (Vão do Paramã) remanescente da superfície Velhas, afloram as rochas do Grupo Bambuí, mais especificamente a Formação Lagoa do Jacaré, compostas por carbonatos intercalados com rochas pelíticas, onde se concentram 150 cavernas catalogadas junto ao

CECAV/ICMBio (Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas) (observar a Figura 22 no mapa geológico).

O estudo indireto de áreas extensas, em tempo hábil e baixo custo, com a utilização de diferentes metodologias, pode ser facilitado ao se integrar geotecnologias disponíveis no mercado com as ferramentas tradicionais de campo para confirmação ou obtenção de informações locais. De forma que se esperava que o GPR fosse capaz de levar ao entendimento geomorfológico em subsuperfície, buscando a compreensão do desenvolvimento da Catena, podendo confirmar a situação dos contatos entre as litologias e indiretamente confirmar como cada pedon analisado se comporta na toposequência.

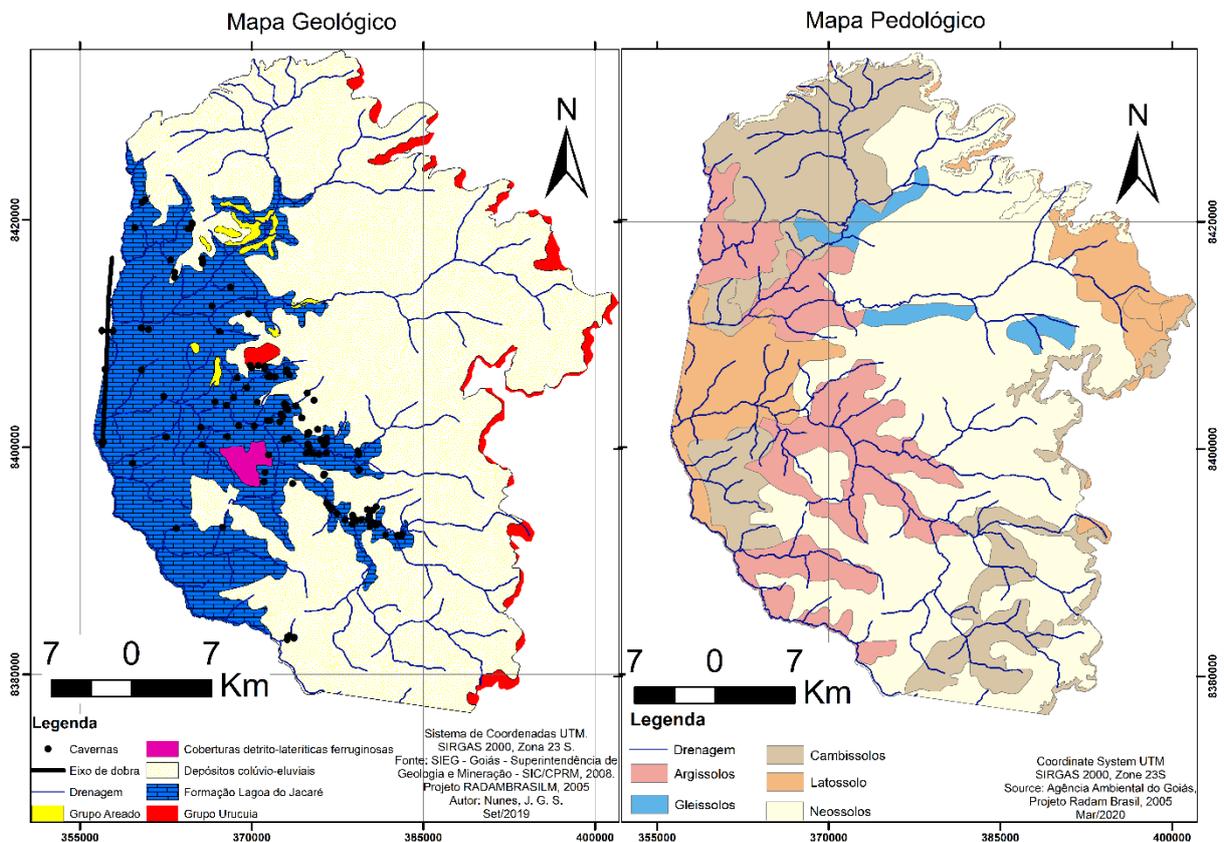


Figura 22. Mapa geológico elaborado com a base de dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), e pedológico elaborado a partir da base de dados do SIEG-GO da APA NRV.

Os estudos bibliográficos apontavam para a presença generalizadas (sem a individualização de formações geológicas) de rochas do Grupo Urucuiá, mas as atividades de campo tornaram possível a individualização de duas formações, em ordem estratigráfica, primeiramente a Formação Posse, apresentando arenitos (com composição mais próxima de um quartzarenito) de matriz fina, cor esbranquiçada e grandes estratificações cruzadas típicas de ambiente de deposição eólica (Dunas). Sobreposta a esta, encontra-se a Formação Serra das Araras apresentando arenitos avermelhados com morros testemunhos suportados por camadas espessas de couraças lateríticas, com composição avermelhada que indica a presença de argilas e os clastos arredondados, presença menos frequente e de menor porte de estratificações cruzadas, apontando transporte fluvial e eólico. Estas formações foram previamente descritas por Campos e Dardenne, (1997). No Grupo Bambuí, a partir da erosão ocorrida na Formação Capacete, os arenitos do Grupo Areado e grande porção de pelitos e carbonatos da Formação Lagoa do Jacaré foram exposto à superfície (CAMPOS & DARDENNE, 1997).

O mapa apresentado na Figura 22 apresenta informações da base de dados do Sistema Estadual de Estatística e Informações Geográficas do Estado do Goiás (SIEG). As informações pedológicas foram obtidas da Agência Ambiental do Goiás (atualizadas do programa RADAMBRASIL), quanto à geologia, as informações foram adquiridas no SIG-Goiás - Superintendência de Geologia e Mineração – SIC/ CPRM, 2008. A compartimentação pedológica se deu com base na geológica local, isto é, as classes de Argissolos e porções de Latossolos foram enquadradas nos domínios das rochas carbonáticas da APA, enquanto que os Neossolos foram enquadradas nos Grupos Urucuia (Formação Posse e Serra das Araras) e, em menor proporção, no Grupo Areado (colúvios-eluviais).

Os mapas base da Figura 22 auxiliaram no planejamento inicial de campo, ajudando na escolha dos perfis de GPR, e alguns foram rearranjados posteriormente às visitas de campo. Os perfis de GPR foram executados em áreas de encostas, relevos planos ou suave ondulados, em diferentes litologias, para que pudesse ser representativo para tipos pedológicos detectados, como também demarcar as transições entre os solos. E segundo Twizere et al., (2017), embora uma grande variedade de modelos, tenham sido propostos para descrever as propriedades dielétricas de um solo para todas as suas variáveis, nenhum deles contemplam plenamente o meio em questão, devido às características heterogêneas dos materiais pedológicos, o que dificulta a aplicação de um modelo específico, como também a escolha da antena e de filtros adequados ao processamento de dados.

Para aquisição de dados, fez-se uso do GPR da marca GSSI, modelo SIR 3000, com Rugged Survey Cart e unidade de controle. Optou-se pela antena com frequência central de 400Mhz e aquisição em distância no modo constant off set. Os parâmetros básicos de aquisição foram os mesmo para todos os perfis, com amostras por Traço (sample) de 1024 e janela temporal (range) de 150ns, alcançando em média 5 metros de profundidade de investigação em média, metodologia adotado por Nunes et al., (2019), para distinção entre colúvio e alúvio.

O processamento dos perfis de GPR foi realizado no software ReflexWin. Os passos executados no processamento dos perfis de GPR são o Static correction, Remove Header gain, Energy decay, Bandpassfrequency, Espectral whitening, Subtract Average, o Envelope e novamente através da função Static correction a topografia do terreno foi inserida no perfil. Estas etapas de processamento permitiram ou facilitaram a visualização de estruturas e contatos entre os materiais pedológicos e geológicos, conforme se observa nas seções de GPR das figuras Figura 23, Figura 24 e Figura 25.

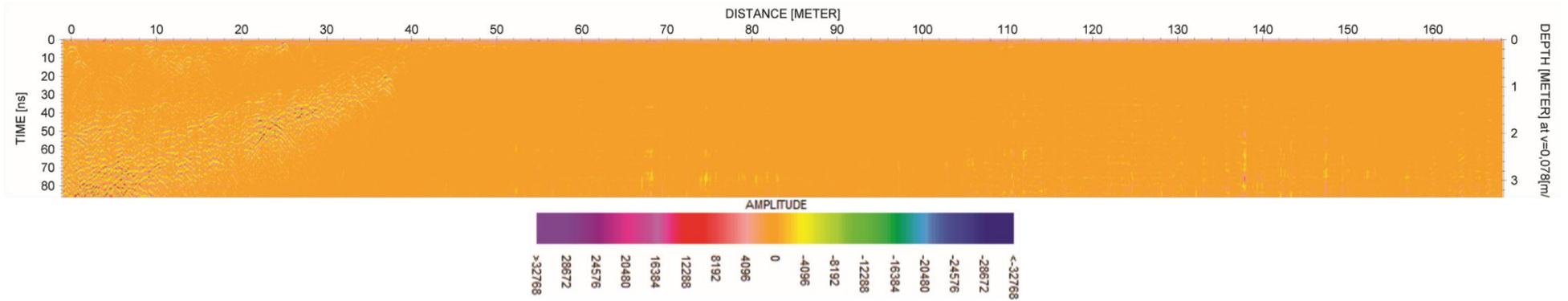


Figura 23. Seção de GPR executado na região da Caverna da Tarimba, apresentado no radargrama sem processamento.

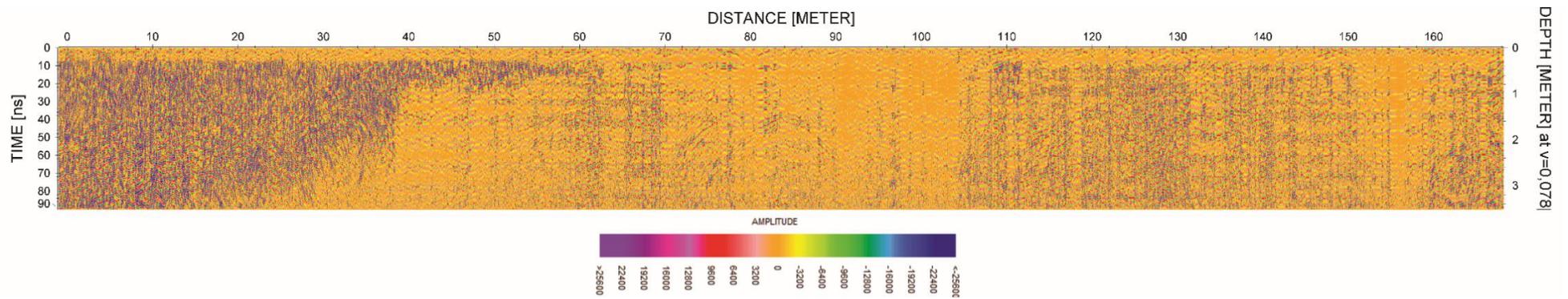


Figura 24. Seção de GPR executado na região da Caverna da Tarimba, com todas as etapas de processamento sem o envelope, e sem aplicação do relevo.

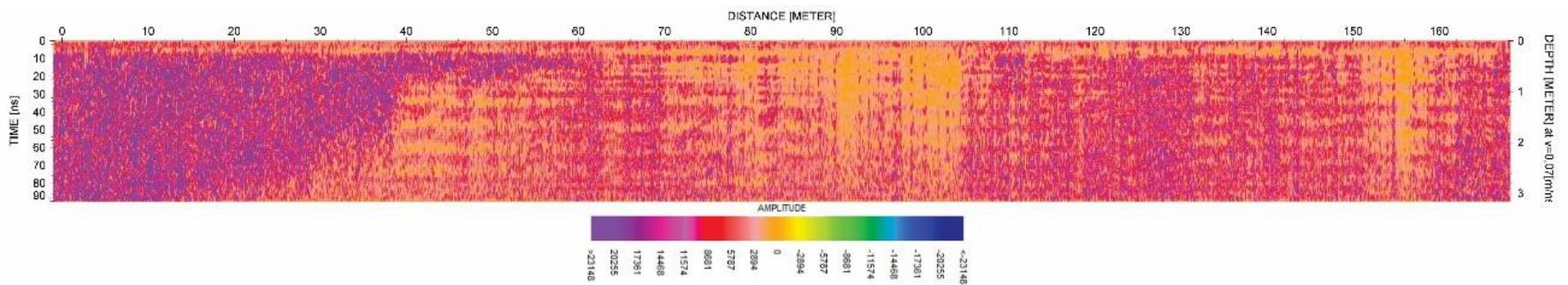


Figura 25. Seção de GPR executado na região da Caverna da Tarimba, com todas as etapas de processamento executadas, sem aplicação do relevo.

O Static correction serve para eliminar o efeito da onda direta e realizar a correção do tempo zero. Este tipo de correção é primeiro passo aplicado em processamento de perfis de GPR. O Remove Header Gain atua na remoção da curva de ganho, que é aplicada durante a aquisição de dados, obtendo os dados brutos, sem a amplificação que ocorre com variação de tempo. O Energy Decay fornece um ganho do sinal, que serve para compensar a decomposição energética durante a propagação do sinal no meio. O Bandpassfrequency funciona como um equalizador, eliminando frequências abaixo e acima de um corte definido. O Espectral whitening é um processamento geralmente aplicado após a migração, para melhorar a resolução e a aparência dos dados de reflexão, como tentativa de corrigir a atenuação da frequência. O Subtract Average é utilizado com a intenção de reduzir o ruído, baseando-se na suavização do sinal, através de cálculos da média dos traços. O envelope permite obter uma visão geral da distribuição de energia dos traços e, podendo facilitar a determinação das primeiras chegadas do sinal.

Os dados de GPR apresentados no radargrama, depois de processados, possibilitam a inferência de informações importantes em subsuperfície, geológicas e pedológicas. Através do processamento aplicado, a visualização entre as litologias e conseqüentemente dos solos nas encostas ficou mais clara, sendo possível delimitar transições.

Baseado nas informações de campo obtidas com a coleta de dados, foi realizada uma classificação da área em domínios morfológicos baseado em zonas homologas e na padronização do relevo. Esta classificação baseada em características geomorfológicas está apresentada na Figura 39. As características de cada domínio são inerentes as estruturas superficiais, que são reflexo direto das litologias apresentadas.

O Domínio das Chapadas está representado pelas áreas na porção sudeste da Apa, apresentando as cotas mais elevadas, suportadas por carapaças lateríticas presentes na Formação Serra das Araras. Devido à presença de óxidos e argilominerais desta formação, e por se tratar de áreas bem drenadas, as condições são favoráveis para o desenvolvimento de Latossolos.

O Domínio das Planícies está associado as rochas da formação Posse, principalmente na porção nordeste da Apa. Os arenitos de matriz eólica sem a presença de feldspatos, óxidos e argilominerais são mais facilmente intemperizados, sendo que este material de origem está associado a formação de Neossolos Quartzarênicos.

O Domínio dos Carbonatos está associado as rochas carbonáticas e pelíticas da Formação Lagoa do Jacaré. Através da dissolução da calcita presente nestas rochas se formam as estruturas carsticas expressas na forma de cavernas, cânions e dolinas, o material pedológico produto destas rochas são os Chernossolos, caracterizados por horizontes irregulares, em geral pouco profundos e pela presença de argilas de alta atividade.

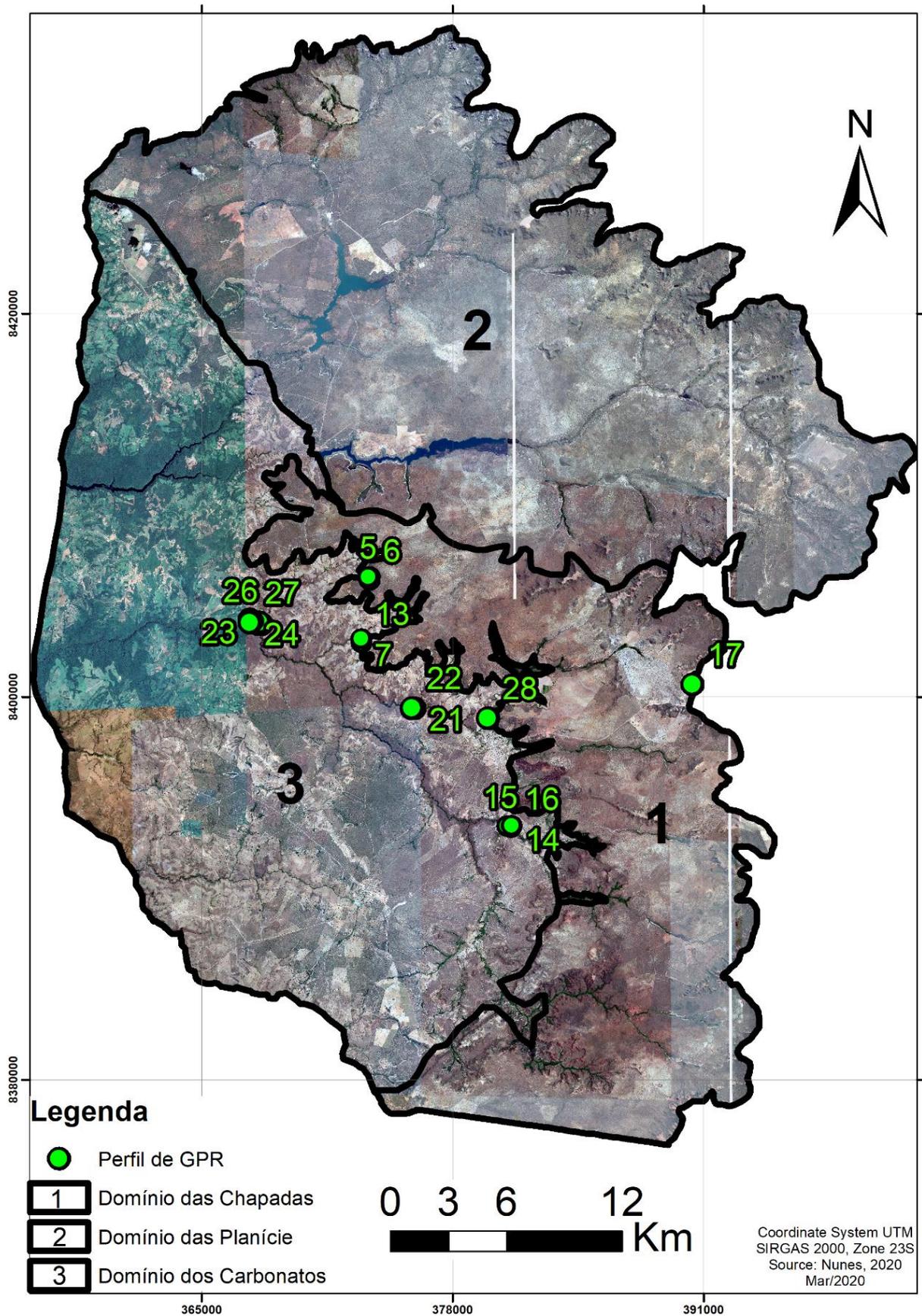


Figura 26. Imagem da compartimentação da APA NRV, e perfis de GPR.

Resultados e Discussões

Através da análise da paisagem, descrições morfológicas e ensaios de fertilidade chegou-se ao diagnóstico de seis categorias de solos presentes na Apa NRV, dentre eles Cambissolos, Chernossolos, Latossolos, Neossolos Litólicos, Neossolos Quartzarênicos e Organossolos.

Os Cambissolos são uma classe muito variável, apresentando como características ausência de texturas médias ou finas e baixo desenvolvimento em relação a profundidade, com presença de fragmentos de rochas. Podem estar associados a qualquer litologia presente na Apa NRV, desde que a declividade do terreno não permita um perfil profundo de acúmulo de material pedológico.

Os Chernossolos são diagnosticados por um horizonte A chernozêmico, seguido por um B incipiente ou textural, ambos com argila de alta atividade e eutróficos. Na Apa NRV estes solos estão associados as rochas carbonáticas (Figura 27) da Formação Lagoa do Jacaré, os relevos planos ou suave ondulado, e posições de meia encosta contribuem para a formação deste solo, apresentando textura argilosa, grau das estruturas muito forte, blocos subangulares, e consistência dura quando seco e firme na presença de umidade.

Os Latossolos são solos que passaram por processos longos de intemperização, marcado pela presença de um horizonte Bw, com abundância em óxidos de ferro, alumínio, e argilas de baixa atividade. Os Latossolos da Apa NRV apresentam cor vermelho-amarelo, textura média, grau moderado, forma granular com blocos subangulares, consistência macia quando seco e friável quando úmido, com poros de variados tamanhos, e a topografia do relevo é plano. Estão associadas as chapadas (Figura 27).

Os Neossolos Litólicos apresentam baixo grau desenvolvimento in situ, mas uma característica diagnóstica deste solo é a baixa profundidade. Estão associados aos relevos mais dissecados ou íngremes, sendo mais comumente ligados aos siltitos da Formação Lagoa do Jacaré, mas também foram descritos entre os arenitos do Grupo Urucua (Figura 27).

Os Neossolos Quartzarênicos são pouco evoluídos, constituídos por material mineral e menos de 20 cm de material orgânico, sem nenhum horizonte B diagnóstico. Na Apa NRV estes solos estão associados a duas litologias, a Formação Posse (Figura 27) composta por arenitos esbranquiçados, com estratificações cruzadas decamétricas, exposto principalmente em áreas de depressões periféricas ou nas Cuestas. A outra litologia associada a estes solos é o Grupo Areado (residual) composto por arenitos amarelados.

Os Organossolos, diagnosticados por um horizonte hístico, apresentam uma espessura mínima de 60cm, com uma composição mínima de 75% de matéria orgânica, com a saturação do horizonte C durante a maior parte do ano. Na área da Apa NRV, eles estão associados as regiões de drenagens (Figura 27), principalmente na Formação Posse, os relevos variam de plano a suave ondulado.

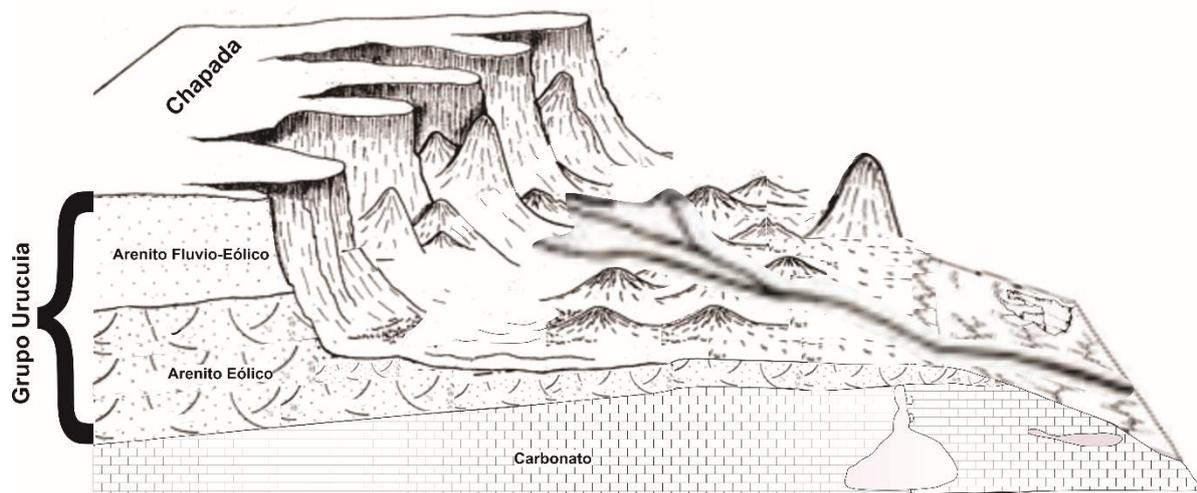


Figura 27. Modelo Geomorfológico da APA NRV, apresentando as litologias presentes na região, que exercem forte controle sobre as formações pedológicas.

Os 14 perfis de GPR, enumerados no mapa da Figura 26, apresentam extensão média de 300m, realizados na maior parte dos solos descritos, apresentando uma profundidade média de 4,5m. A maioria foi orientada a explorar a disposição e solos na Catena, sendo que os dados dos sete perfis, que apresentaram relevância para a pesquisa, foram organizados na Tabela 6.

Tabela 6. Perfis de GPR executados na APA NRV, os valores apresentados para a profundidade e range foram obtidos com base na média da velocidade de propagação da onda no meio.

Perfil de GPR	Extensão (m)	Solos	Profundidade (m)	Antena (MHz)	Range (ns)
04	120	Neossolo Q.	4,00	400	86
05	165	Neossolo Q./ Neossolo L. Cambissolo/Chernossolo	3,40	400	92
07	430	Neossolo Q./ Neossolo L. Cambissolo/Chernossolo	4,00	400	93
15	240	Chernossolo	3,40	400	86
16	89	Cambissolo/Chernossolo	3,40	400	86
17	440	Latossolo	5,20	400	87
21	145	Paleocanal/ Estratificação Colúvio/Terraço Avulionar		400	

Os quatro radargramas apresentados a seguir (Figura 29; Figura 30; Figura 31; Figura 35) demonstram as condições recorrentes encontradas na área. O primeiro deles é demonstrando com um croqui detalhado da área e imagem de alta resolução (Figura 28) obtida por drone mostrando a importância do controle das cavernas sobre a Catena da área, demonstrando uma situação clássica da APA NRV, na qual a morfologia da transição dos arenitos para os carbonatos que estão subjacentes ao primeiro. Esta transição normalmente se dá por quebras abruptas, na forma de encosta íngremes, com a presença de erosões em estágio avançado. Parte destas estruturas estão relacionadas com a carstificação, que nesta situação se expressa externamente sob a forma de dolinas.

Através do perfil de GPR da Figura 29 (perfil 05 da Figura 39), foi possível identificar o contato entre três litologias (Arenito da Formação Posse; Pelito da Formação Lagoa do Jacaré; Carbonato da Formação Lagoa do Jacaré), que são o material de origem para a formação in situ

das classes pedológicas diagnosticadas como Neossolo Quartzarênico, Neossolo Litólico e Chernossolo, sendo que é possível observar a mesma seqüência estratigráficas em outros perfis de GPR.

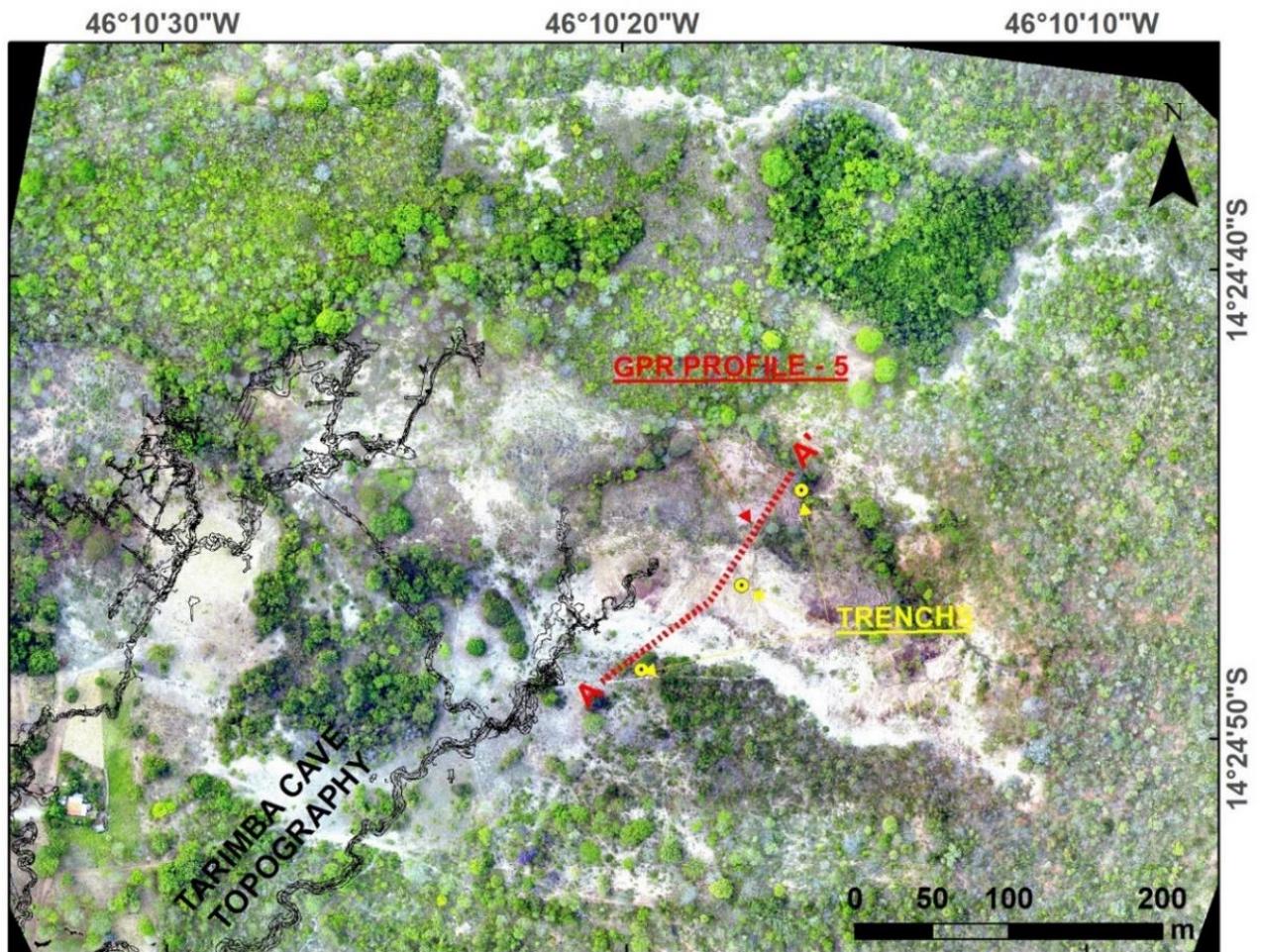


Figura 28. Localização do perfil de GPR 05, executado próximo à Caverna da Tarimba.

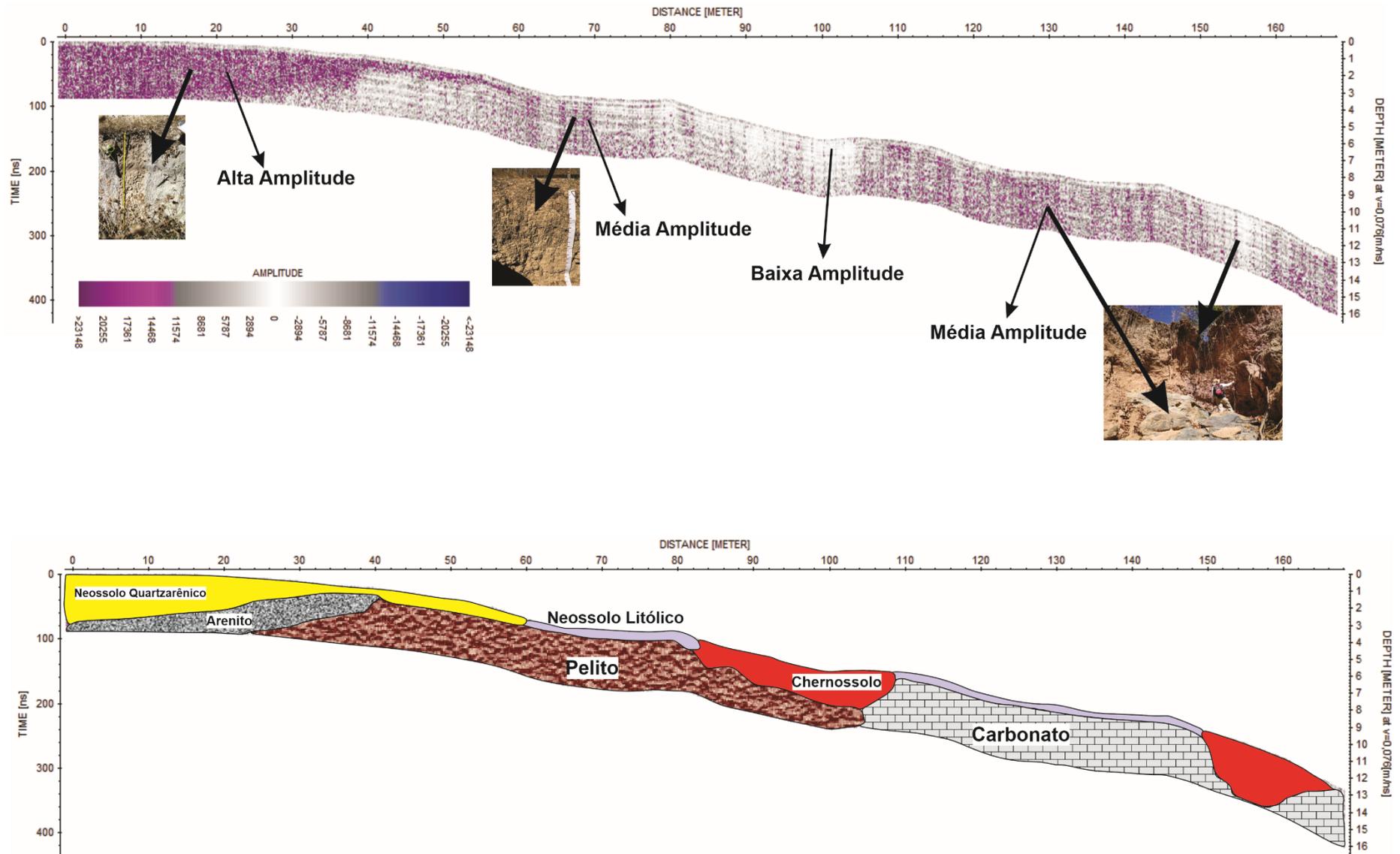


Figura 29. Resultados da seção de GPR 05, executado na região da Caverna da Tarimba, com a topografia aplicada ao perfil, e as fotografias do solo.

Os dados de refletância estão apresentados em amplitude verdadeira. A seção de GPR da Figura 29 demonstrou basicamente três níveis de refletância de acordo com a escala de amplitude (baixa < 2894; média ≥ 2894 e ≤ 11574 ; alta > 11574), o primeiro nível que se estende até os primeiros 40m é o de mais alta refletância, relativamente uniforme, sendo esta parte onde se concentra os arenitos e o Neossolo Quartzarênico. A segunda faixa que vai de 40m à 102m, apresentou baixa refletância com porções de média refletância, sendo esta porção do radargrama onde ficam localizados os siltitos e os Neossolos Litólicos. A terceira Faixa que compreende a extensão de 102m à 165m, apresenta refletância média, com uma pequena porção, no fim do perfil, de baixa refletância, sendo que nesta faixa é onde estão localizados os carbonatos e Chernossolos.

A Figura 29 demonstra uma situação recorrente na APA NRV, ilustrando a morfologia da transição dos arenitos para os carbonatos que estão subjacentes ao primeiro. Esta transição normalmente se dá por quebras abruptas, na forma de encosta íngremes, com a presença de erosões em estágio avançado. Parte destas estruturas estão relacionadas com a carstificação, que nesta situação se dá externamente, na forma de dolinas. O contato entre o arenito e o siltito apresenta a mesma morfologia, confirmado pelos perfis de GPR das Figura 29 e Figura 30.

O perfil realizado próximo a caverna Extrema (Figura 30 e perfil 07 da Figura 39), apresenta uma constância estrutural e litoestratigráfica das rochas, confirmando os dados estudados na Catena, facilitando a geração de um modelo geomorfológico que pode ser aplicadas para Apa NRV, com pequenas correções, a depender do domínio morfológico.

A seção de GPR da Figura 30 apesar de mais extensa, apresentou similaridade estrutural com o perfil da Figura 29, sendo que esta seção de GPR apresenta na extensão inicial que vai até aproximadamente 50m, um material de mais alta amplitude de refletância (≥ 20480), e o seu contato com material subjacente apresenta uma quebra em forma de rampa. O material seguinte que vai de 50m à 170m apresenta baixa amplitude de refletância do sinal (0 a 8192), com algumas porções de média amplitude de refletância (8193 a 20479). Já na faixa mais baixa da seção de GPR, que vai de 380m à 425m, o sinal de refletância é mais alto e uniforme.

A seção de GPR executados nestas áreas conseguiram demonstrar que carbonatos calcários mais puros e carbonatos marga apresentam diferentes resposta de refletância, sendo que a argila presente nos carbonatos marga causam atenuação do sinal eletromagnético, e por esta razão a amplitude de reflexão destes são menores que nos calcários mais puros. Os calcários mais argilosos favorecem a formação dos Chernossolos enquanto que os calcários mais puros concentram a maior parte das estruturas carsticas, que na região incluem cavernas, cânions e dolinas.

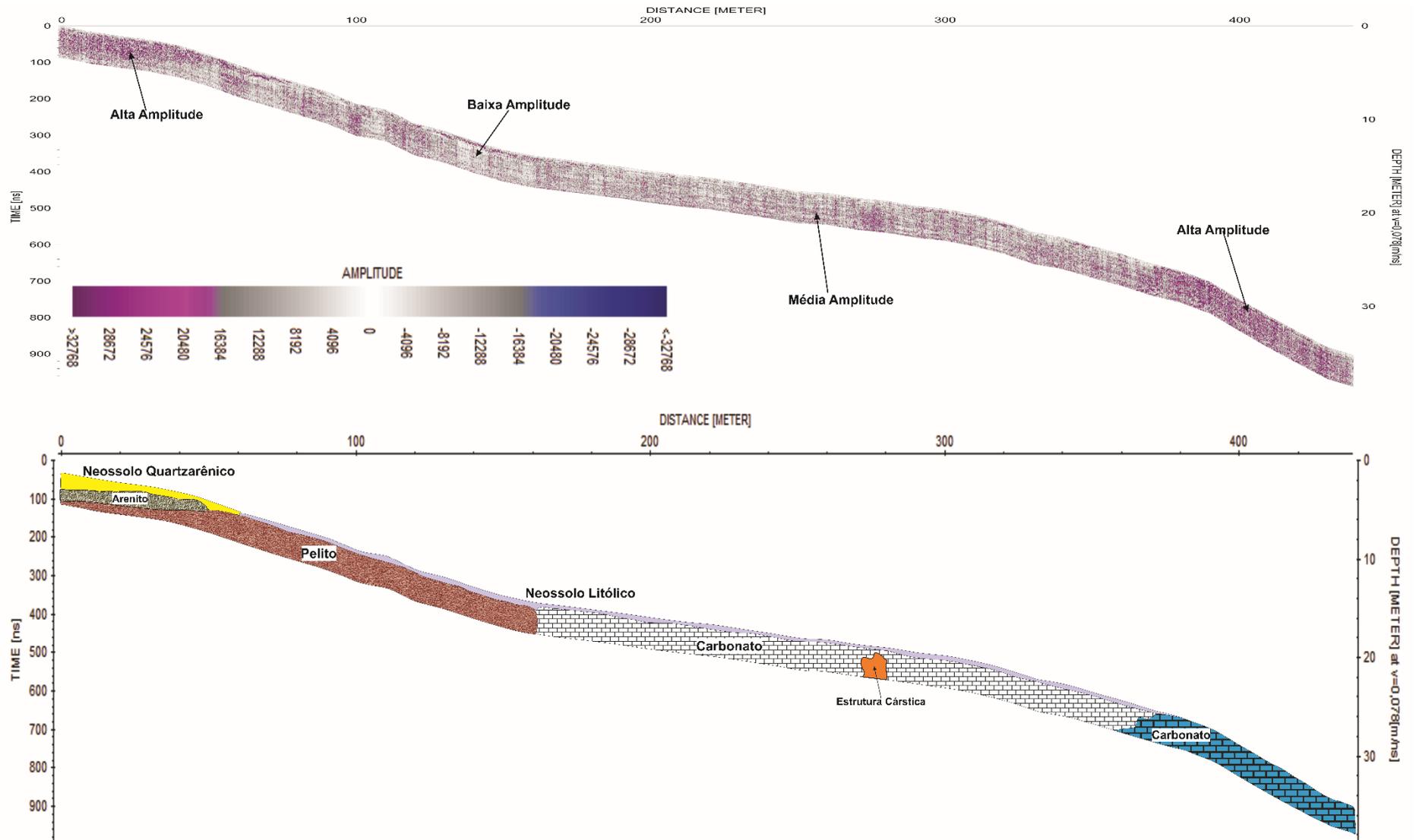


Figura 30. Resultados da seção de GPR 07, executado na região da Caverna Extrema, com a topografia aplicada ao perfil, e as fotografias do solo.

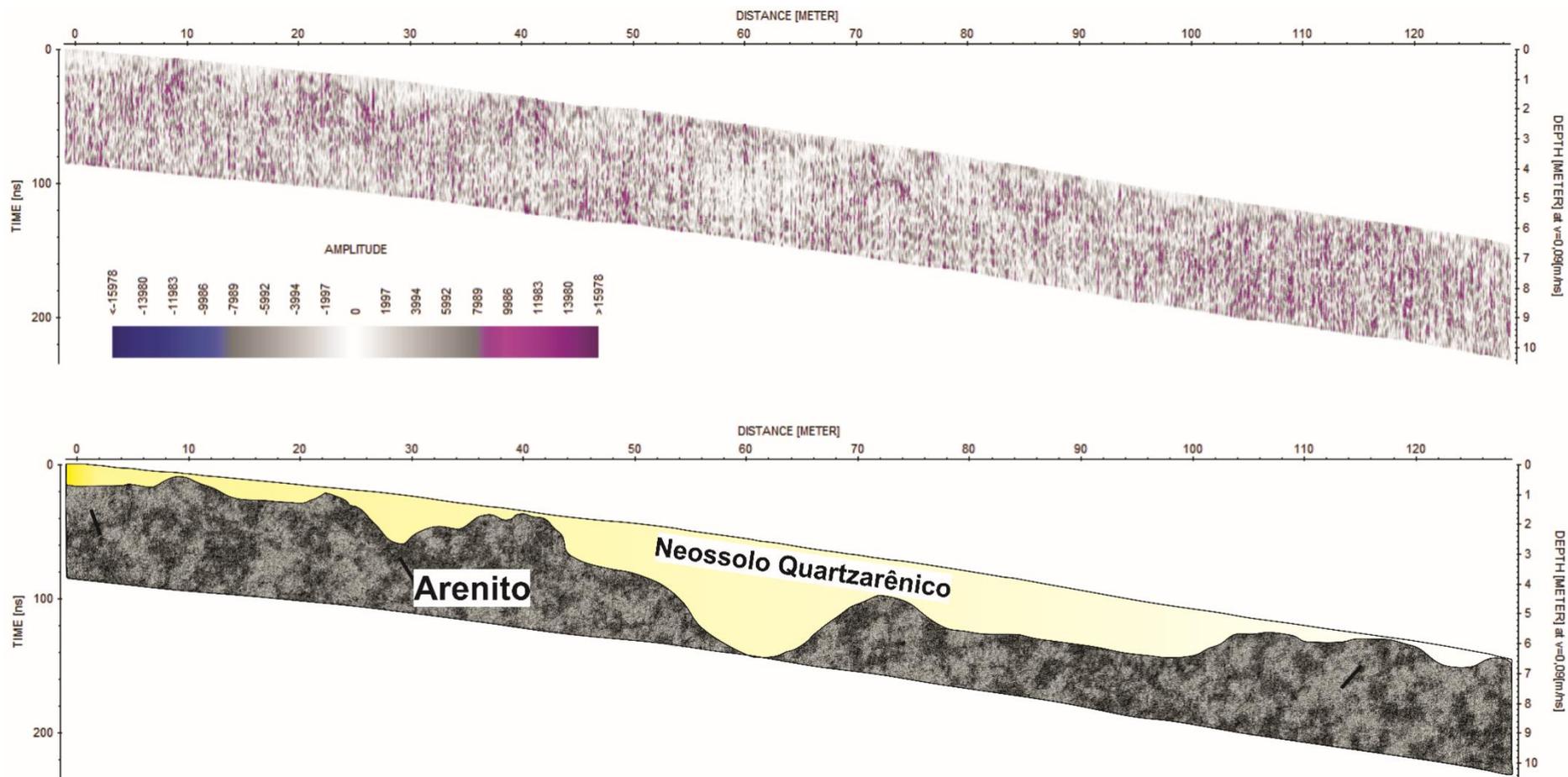


Figura 31. Seção de GPR 04, demonstrando a situação de contato entre arenitos da Formação Posse e Serra das Araras.

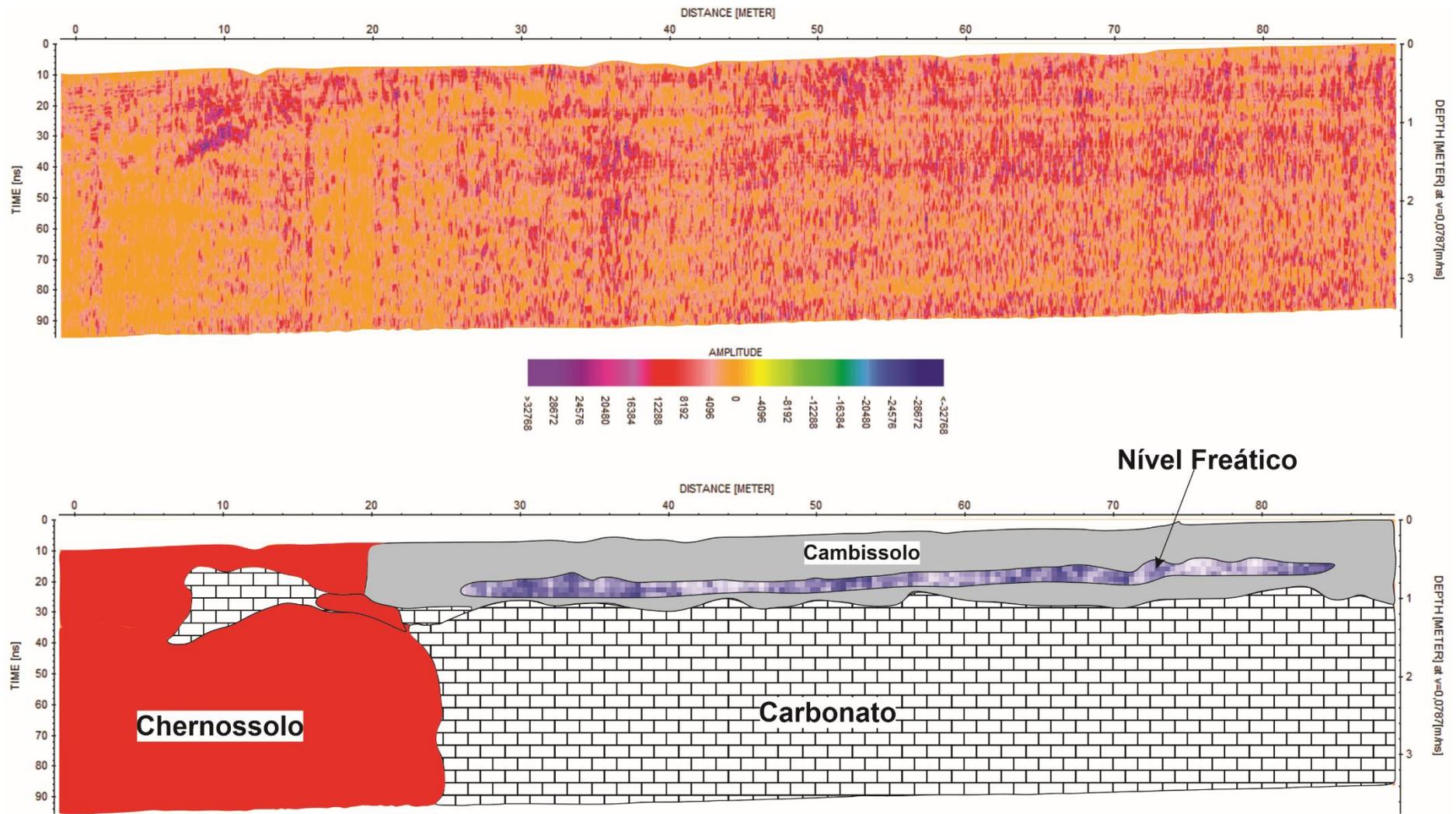


Figura 32. Seção de GPR 15, realizado na área da Calmasa Calcário Mambai S/a, próximo a drenagem.

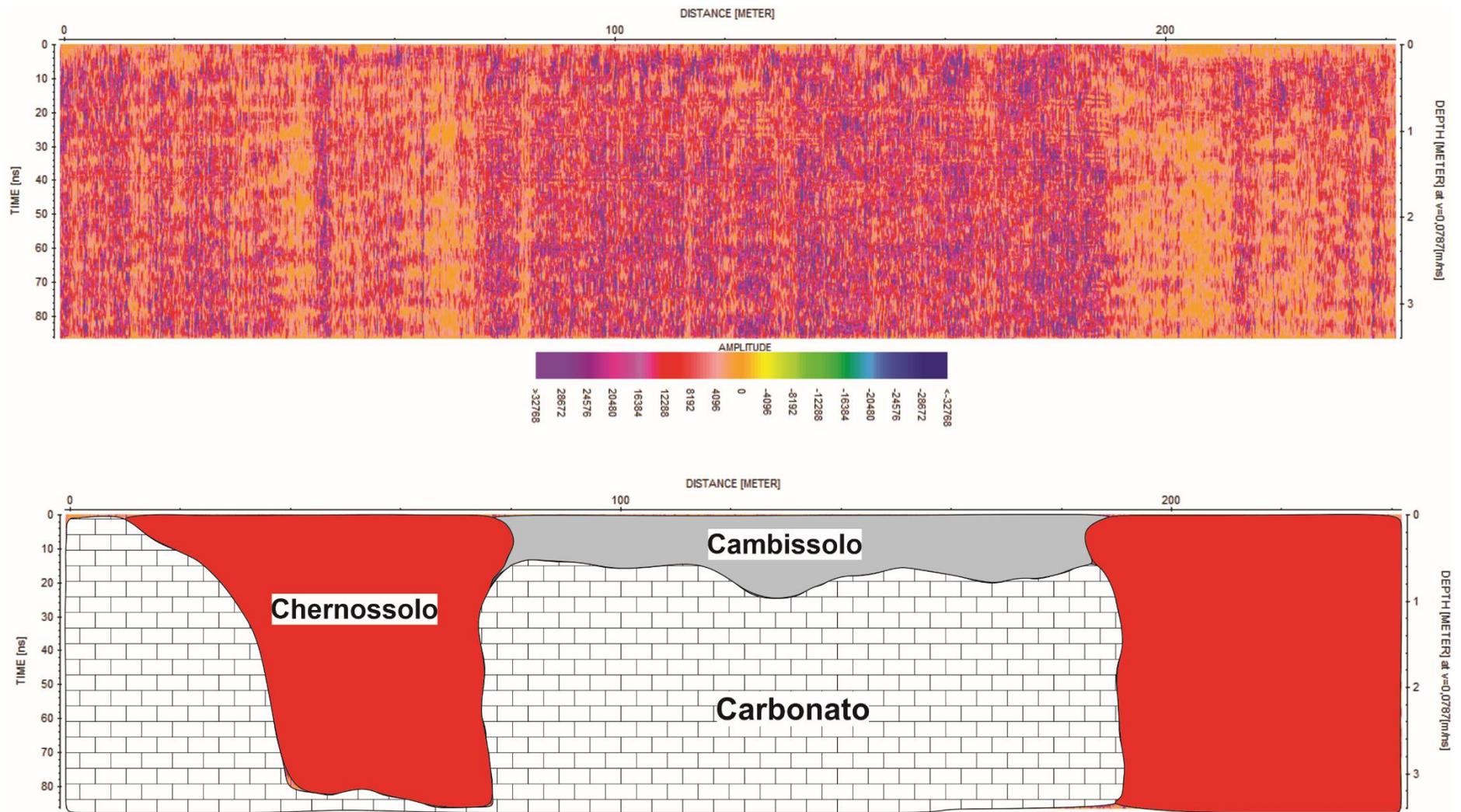


Figura 33. Seção de GPR 16, realizado na área da Calmasa Calcário Mambá S/a.

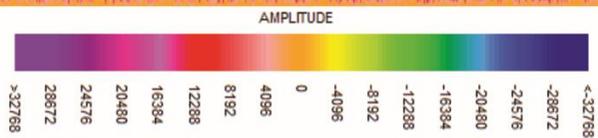
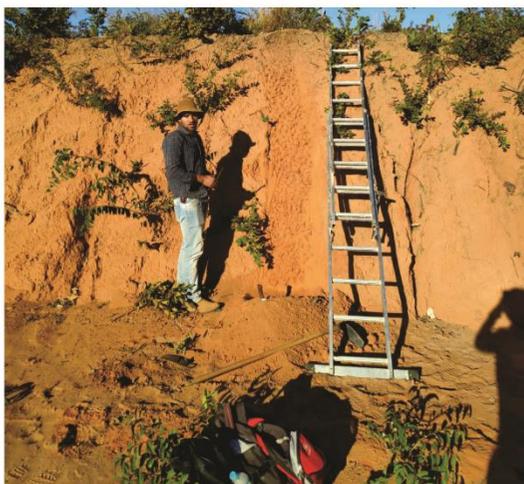
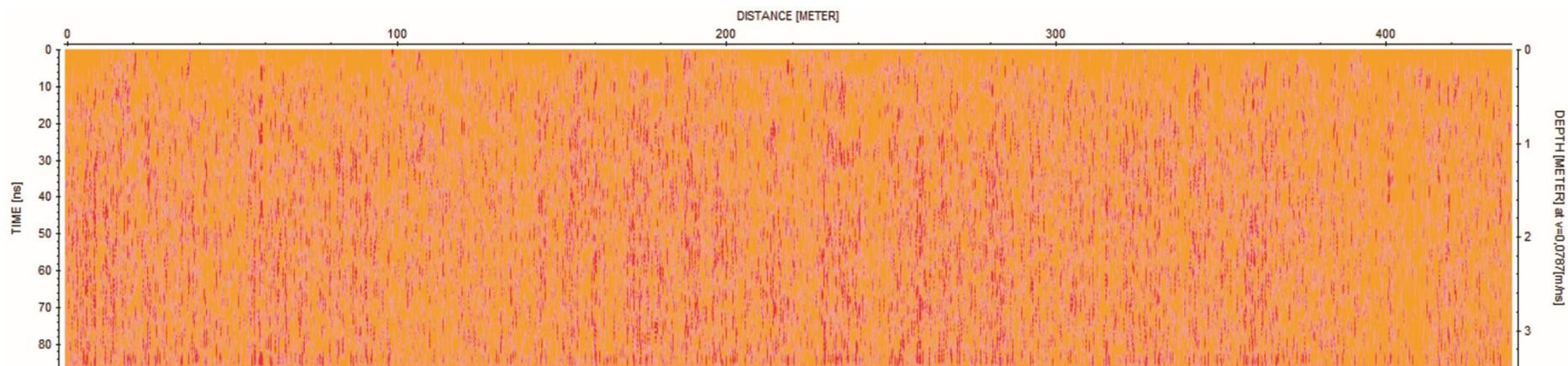


Figura 34. Seção de GPR 17, realizado em uma área de chapada, demonstrando a relativa homogeneidade de latossolos, que são profundos, expressa em uniformidade.

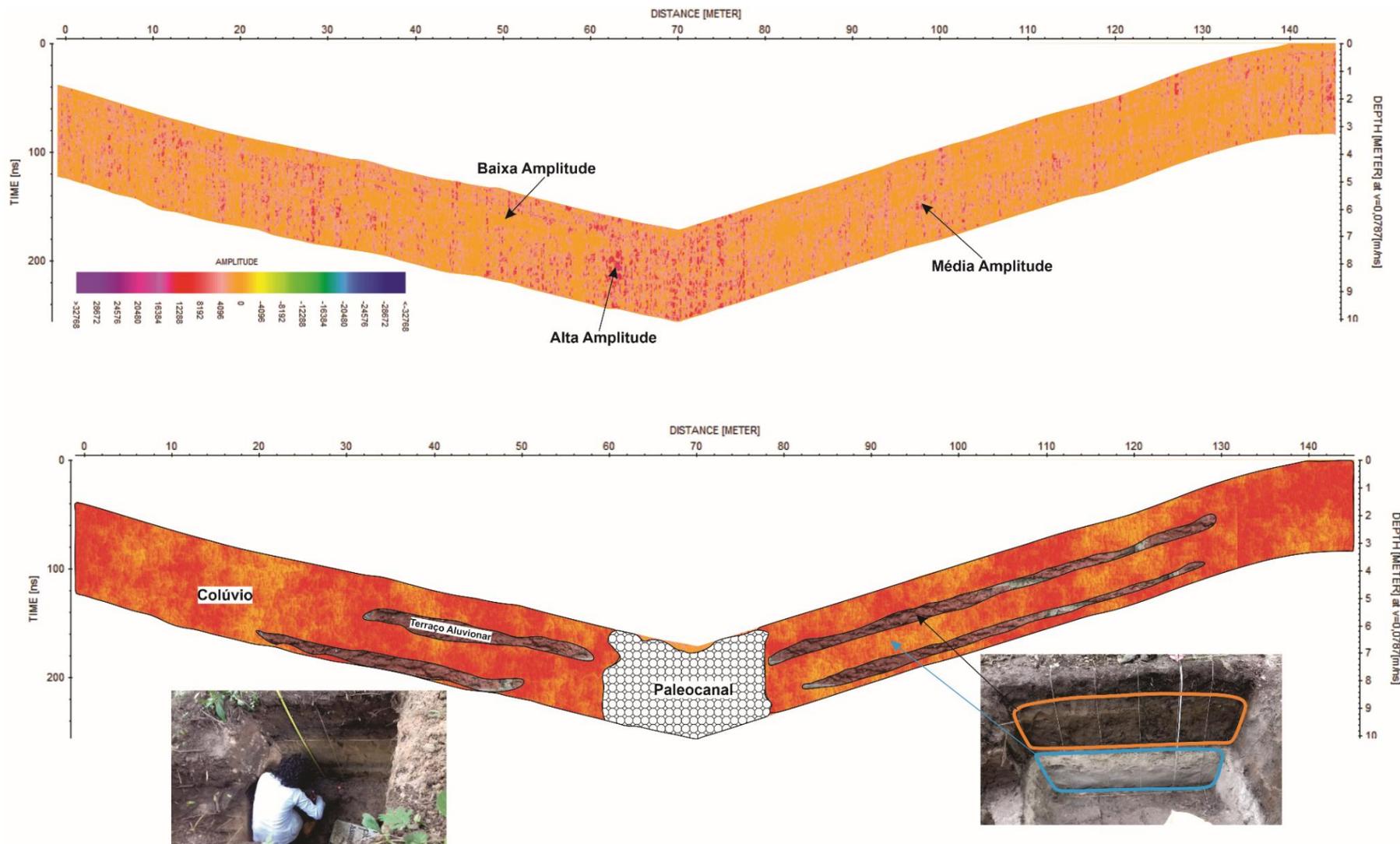


Figura 35. Seção de GPR 21, realizado na área de um paleocanal, próximo a Cachoeira do Funil.

A seção de GPR 04 da Figura 31 apresenta o contato entre um material que apresenta baixa amplitude de reflectância (0 a 4096), mais superficial, com maior profundidade entre 50 e 70m. O material subjacente apresenta média amplitude de reflectância, e tem início na faixa que vai de 32m até 124m, onde ele é aflorante.

O contato entre o Neossolo Quartzarênico e o arenito da Formação Posse pode ser observado da seção de GPR 04 da Figura 31. Este perfil foi realizado em uma área próxima à seção de GPR 05, porém de maior elevação. Provavelmente os óxidos e outros minerais presentes na Formação Posse, são os responsáveis pela maior amplitude de reflectância da rocha em relação ao solo formado acima, que já foi lixiviado e por isso apresenta menor amplitude.

A seções de GPR 15 e 16 (Figura 33 e Figura 32) foram realizadas na área da pedreira Calmasa. Na seção 15 seção, o material de maior amplitude de reflexão (>8192) representa as rochas carbonáticas, já as amplitudes médias e baixas (≤ 8192) indicam a formação de solo. Além do contato entre o carbonato e o Chernossolo e Cambissolo, apresentou uma estrutura relativamente retilínea, tendo sido interpretada como o topo do nível freático, devido à proximidade do perfil com a drenagem. A seção de GPR 16 apresentou similaridade com a anterior devido a proximidade entre os perfis.

O Latossolo se apresentou da seção de GPR 17 (Figura 34), realizado próximo a uma estrada, em área de chapada, apresentou-se profundo, sem a presença de alvos que se destacassem na análise da amplitude de reflexão, e como a antena de 400 MHz alcançou pouco mais de 3m de profundidade, não foi possível observar o saprolito, como nos perfis realizados em outros solos.

A seção de GPR 21 representado pela Figura 35, realizado em um fundo de vale encaixado, próximo a Cachoeira do Funil, apresenta um material de alta reflectância no centro da seção de GPR, que vai de 60m à 75m, onde fica localizado o paleocanal, com uma quebra abrupta nas suas margens. Os materiais dos dois lados apresentam intercalações de média e baixa reflectância, quase retilíneas ao longo das encostas. Estes materiais foram confirmados como terraço aluvionar e colúvios depositados em períodos mais recentes (provavelmente quaternário). O paleocanal provavelmente foi abandonado após o colapso da caverna que hoje compõe a Cachoeira do Funil.

Considerações Finais

A detecção de discordâncias nos perfis pedológicos pode ser mais fácil detectada com o uso do GPR, pois a aquisição de dados em campo é rapidamente efetuada ao longo de um perfil, já as ferramentas tradicionais exigem mais tempo, e apresentam descrições pontuais, dificultando inferências de informações regionais.

O GPR tem se mostrado como uma geotecnologia de fácil manuseio, rápida aquisição e resultados eficientes, para estudos de profundidade rasa. No estudo de caso das classes de solos na Apa NRV, o GPR conseguiu demonstrar com nitidez o comportamento das camadas litológicas e, por conseguinte com se dá o desenvolvimento pedogenético na região. As diferenças composicionais ajudaram no contraste das amplitudes de reflexão, tendo em vista que os materiais mais arenosos com a presença de óxidos tendem a apresentar maior amplitude de reflexão e, materiais argilosos causam o efeito inverso, devido à atenuação do sinal. As diferenças dos solos através das análises do sinal da onda eletromagnética são melhores observadas entre os Neossolos Quartzarênicos e Chernossolos.

Observando as seções de GPR é possível visualizar os contatos entre solos e rochas, demonstrando que a metodologia é aplicável neste tipo de estudo. Solos com diferentes composições entre óxidos, argilas e matéria orgânica apresentam respostas de diferentes de amplitude de reflexão.

A antena de 400 MHz se provou ideal para o mapeamento da interface solo/rocha e, no caso da ambiente cárstico, a epicarste. As ondas eletromagnéticas alcançando uma profundidade entre 3m e 5m, apresentou resolução suficiente para diferenciar solos, rochas, estruturas e variações composicionais.

As rochas carbonáticas dentro do ambiente estudado apresentaram alta amplitude de reflexão quando comparada às demais, o que facilitou a delimitação dos Chernossolos neste material de origem, que em geral apresenta perfis rasos e pontuais.

Os Neossolos Quartzarênicos apesar de apresentar perfis espessos, puderam ter a sua interface com os arenitos delimitados nas regiões de transição com rochas do Grupo Bambuí. Mas as amplitudes de reflexões dos Neossolos Quartzarênicos e dos arenitos não apresenta valores muito distantes, o que exige mais atenção ao observar seções de GPR nestes ambientes.

Latossolos apresentaram uniformidade em toda a seção de GPR, diferente de Cambissolos e Neossolos Litólicos que são rasos, possibilitando a visualização da interface solos/rocha ou saprolito. O método de GPR foi capaz de demonstrar o grau de desenvolvimento de cada solo, contribuindo para a classificação de cada material pedológico.

O GPR demonstrou ser eficiente para estudos de materiais em ambiente deposicionais cárstico e flúvio-eólico. Através de um processamento adequado dos dados, foi possível verificar as profundidades, homogeneidades e heterogeneidades dos materiais, demonstrando que o método, relativamente de baixo custo, apresenta muitas vantagens em relação as técnicas tradicionais de descrição em campo.

Referências

- American Society for Testing and Materials, 2007. Ground Penetrating Radar, 2nd Edition. ASTM D698-07e1 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, USA.
- ARDEKANI, M. R. 2013. Off- and on-ground GPR techniques for field-scale soil moisture mapping. *Geoderma*. V. 200–201, P. 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.010>
- BORECKA, A.; HERZIG, J.; DURJASZ-RYBACKA, M. 2015. Ground Penetrating Radar Investigations of Landslides: A Case Study in a Landslide in Radziszów. *Studia Geotechnica et Mechanica*, v. 37, n. 3, p. 11-18 DOI: 10.1515/sgem-2015-0028.
- CASELLE, C., BONETTO, S., COMINA, C., & STOCCO, S. 2020. GPR surveys for the prevention of karst risk in underground gypsum quarries. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 95, 103137. doi:10.1016/j.tust.2019.103137
- Cassidy, N. J. (2009). Ground Penetrating Radar Data Processing, Modelling and Analysis. *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, 141–176. doi:10.1016/b978-0-444-53348-7.00005-3
- CHEREM, L. F. S.; VARAJÃO, C. A. C. O papel da lito-estrutura do carste na morfodinâmica cenozóica da Serra Geral de Goiás (GO/TO/BA): aproximações iniciais. *Revista Geonorte*, V. 10, P. 180-184, 2014
- FAIZE, A.; LAHALAL, F.; ATOUNTI, M. Study and simulation of soil salinity evolution by Reflexw and GprMax. *ANNALS OF THE UNIVERSITY OF CRAIOVA-MATHEMATICS AND COMPUTER SCIENCE SERIES* Vol: 46 Ed 2 Pág: 426-432. 2019. ISSN: 1223-6934
- FORD, D.C.; WILLIAMS, P.W. (1989) *Karst Geomorphology and Hydrology*, Unwin Hyman, London.

- HONEYCUTT, C. W.; HEIL, R. D.; COLE, C. V. (1990). Climatic and Topographic Relations of Three Great Plains Soils: II. Carbon, Nitrogen, and Phosphorus. *Soil Science Society of America Journal*, 54(2), 476. doi:10.2136/sssaj1990.03615995005400020031.
- JOL, H.; BRISTOW, C.; 2003. GPR in sediments: Advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. Geological Society Special Publication, 211 pp. 9-27. 10.1144/GSL.SP.2001.211.01.02.
- KARIM, M. N. A.; JAMLOS, M. A.; IBRAHIM, S. Z.; JAMLOS, M. F.; LEE, Y. S. 2019. Geological Effect on GPR System Due to Soil Properties in Malaysia. *International Journal Of Integrated Engineering*. Vol: 11, Ed: 3, Pág: 313-320.
- LAMBOT, S., SLOB, E., CHAVARRO, D., LUBCZYNSKI, M., VEREECKEN, H. 2008. Measuring soil surface water content in irrigated areas of southern Tunisia using full-waveform inversion of proximal GPR data. *NEAR Surf. Geophys.* 6, 403–410.
- LEGRAND, H. E. Perspective on Karst Hydrology. *Journal of Hydrology*. 1983 Vol 61; pag 343—355.
- MINET, J., WAHYUDI, A., BOGAERT, P., VANCLOOSTER, M., LAMBOT, S. 2011. Mapping shallow soil moisture profiles at the field scale using full-waveform inversion of ground penetrating radar data. *Geoderma*. Vol 161, P. 225–237. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.023>.
- MINET, J., BOGAERT, P., VANCLOOSTER, M., LAMBOT, S. 2012. Validation of ground penetrating radar full-waveform inversion for field scale soil moisture mapping. *J. Hydrol.* 424–425, 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.034>.
- NEAL, A. 2004. Ground Penetrating Radar and Its Use in Sedimentology: Principle, Problem and Progress. *Earth Science Reviews*, v. 66, p. 261-330. Doi: 10.1016/j.earscirev.2004.01.004.
- NOVAKOVA, E.; KAROUS, M.; ZAJÍČEK, A.; KAROUSOVA, M. Evaluation of ground penetrating 691 radar and vertical electrical sounding methods to determine soil horizons and bedrock at 692 the locality Dehtáře. *Soil and Water Research*, Vol: 8, P. 105-112. 2013. DOI: 10.17221/6/2012-SWR.
- NUNES, J. G. S.; UAGODA, R.; CALDEIRA, D.; BRAGA, L. M.; HUSSAIN, Y. ; CARVAJAL, H. M. 2019. Aplicação do gpr para análise e diferenciação entre materiais aluvionares e coluvionares, embasadas em observações diretas, no Vale do Ribeirão Contagem - Distrito Federal (Brasil). *Revista Brasileira De Geomorfologia*, Vol: 20 Ed: 2 Pág: 217-238, DOI: 10.20502/rbg.v20i2.1382.
- OLHOEFT, G.R. Direct detection of hydrocarbon and organic chemicals with ground penetrating radar and complex resistivity. *Proceedings of National Water Well Association/API Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water*, Ohio, p. 284-305. 1986. DOI: 10.4133/1.2921963.
- Salat, C., & Junge, A. (2010). Dielectric permittivity of fine-grained fractions of soil samples from eastern Spain at 200 MHz. *GEOPHYSICS*, 75(1), J1–J9. doi:10.1190/1.3294859
- SLATER, L.; COMAS, X. 2009. The contribution of ground penetrating radar to water resource research. In: Jol, H.M. (Ed.), *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier, Amsterdam, pp. 203–246.

SMITH, G. S. Directive properties of antennas for transmission into a material half-space. IEEE Transactions on Antennas and Propagation (ISSN 0018-926X), vol. AP-32, March 1984, p. 232-246.

Twizere, C., Ngoga, S. R., Bosco, K. J., Charles, D., & Musabe, R. (2017). FDTD simulation and GPR study in Rwanda tropical soil using permittivity variation. 2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). doi:10.1109/iwagpr.2017.7996066

ULRIKSEN, C. P. F. Application of impulse radar to civil engineering. Doctoral Thesis – Lund University of Technology, 1982. 179 p. Doi: 0016-7622/99-53-5-601.

VAN DAM R.L. 2012. Landform characterization using 62 geophysics-Recent advances, applications, and emerging tools. Geomorphology, Doi: 137:57–73. 63.

WHITE, W.B. 1988. Geomorphology and hydrology of karst terrains. New York, Oxford University Press, 464 pp.

ZHANG, X. L.; DAO, L. G.; ZHANG, C. S.; MORRISON, L.; HONG, B.; ZHANG, H. X.; GAN, Y. M. 2018. Mapping the spatial distribution of soil depth in a grassland ecosystem with the aid of ground penetrating radar and GIS (Northwestern Sichuan, China). GRASSLAND SCIENCE Edição 64, Pag: 217-225

Mapeamento de solos em área cárstica, através do estudo da catena com auxílio de geotecnologias e descrições em campo: Um estudo de caso na APA Nascentes do Rio vermelho, Mambáí – GO.

Resumo

A utilização de diferentes geotecnologias para o mapeamento digital de solos tem crescido nas últimas décadas e pode oferecer à comunidade científica agilidade na categorização de atributos em áreas extensas. No que se refere a eficiência das novas tecnologias, ainda existem dúvidas em relação à classificação que estas metodologias oferecem. Os métodos convencionais de mapeamento, que envolvem coleta em campo, descrição morfológica e análises químicas ainda são considerados os mais confiáveis, porém de alto custo e relativamente lentas. Esta pesquisa teve por objetivo realizar a categorização e mapeamento dos solos na APA Nascentes do Rio Vermelho, utilizando-se de técnicas convencionais e de novas tecnologias para realizar um mapeamento semi-automatizado. Mapeamentos anteriores de solo na escala 1:250.000 demonstram as seguintes categorias: Latossolos; Neossolos Quartzarênicos; Organossolos; Neossolos Litólicos; Cambissolos; Chernossolos. Em relação a litologia, o Serviço Geológico do Brasil categorizou na região três Grupos litológicos (Grupo Bambuí, Grupo Areado, Grupo Urucuia), com destaque para a Formação Lagoa do Jacaré, Formação Posse, Formação Serra das Araras, e três compartimentos geomorfológicos categorizados como Domínio dos Carbonatos, Domínio das Chapadas e Domínio das Planícies. Para categorização prévia dos solos, foram realizadas descrições morfológicas, levando-se em consideração critérios visuais e texturais de campo, como cor, estrutura, porosidade e pegajosidade, para o solo seco e úmido. Foram obtidas curvas espectrorradiométricas, verificando o comportamento espectral de cada material pedológico identificado, para a criação de uma biblioteca espectral. Por fim utilizou-se árvore de decisões no software Envi 5.3 para agrupar todos os parâmetros estudados e gerar o mapa de solos. As curvas espectrais foram úteis no auxílio do agrupamento das classes de solo. Baseado nos dados de campo e laboratoriais associados às geotecnologias, o resultado da categorização e mapeamento do solo foi eficiente, pois os pontos de verificação foram concordantes com o mapa, assim como os pontos de coleta superficial, o que garantiu ao mapa final um grau elevado de detalhamento.

Palavras-chaves: Palavras-chaves: Solo; Geotecnologias; Carste.

Soil mapping in karst area, through the study of the catena with the aid of geotechnologies and field descriptions: A case study at APA Nascentes do Rio Vermelho, Mambáí - GO.

Abstract

The use of different geotechnologies for digital soil mapping has grown in recent decades and can offer the scientific community agility in the categorization of attributes in large areas. Regarding the efficiency of new technologies, there are still doubts regarding the classification that these methodologies offer. The conventional methods of mapping, which involve field collection, morphological description and chemical analysis are still considered the most reliable, but of high cost and relatively slow. This research aimed to carry out the categorization and mapping of soils in the APA Nascentes do Rio Vermelho, using conventional techniques and new technologies to carry out a semi-automated mapping. Previous soil mappings on the 1: 250,000 scale demonstrate the following categories: Ferralsols; Arenosols; Histosols; Leptsols; Cambisols; Chernozems. Regarding lithology, the Geological Survey of Brazil

categorized three lithological groups in the region (BambuÍ Group, Areado Group, Urucuaia Group), with emphasis on the Lagoa do Jacaré Formation, Posse Formation, Serra das Araras Formation, and three geomorphological compartments categorized as Domain of Carbonates, Domain of Chapadas and Domain of Plains. For previous categorization of the soils, morphological descriptions were made, taking into account visual and textural criteria of the field, such as color, structure, porosity and stickiness, for dry and humid soil. Spectroradiometric curves were obtained, verifying the spectral behavior of each identified pedological material, for the creation of a spectral library. Finally, a decision tree was used in the Envi 5.3 software to group all the parameters studied and generate the soil map. The spectral curves were useful in helping to group the soil classes. Based on field and laboratory data associated with geotechnologies, the result of the categorization and mapping of the soil was efficient, as the verification points were in agreement with the map, as well as the surface collection points, which guaranteed the final map a high degree detailing.

Keywords: Soil; Geotechnologies; Karst.

Introdução

A caracterização pedológica de áreas remotas, com representação em mapas de solo tendo o objetivo da redução de escala no que se refere ao detalhamento das informações existentes sendo ainda onerosa atualmente. Este é o motivo de a maior parte dos mapas pedológicos no Brasil apresentarem generalizações. Fatores como o alto custo de amostragem e poucos estudos em grandes áreas, ainda permitem mapas de solo em escala regional, utilizando-se de poucas amostragens em campo, como foi descrito por Bargaoui et al, (2020).

Embora os horizontes do solo e seus táxons associados, tenham sido tradicionalmente estabelecidos com características morfológicas e dados laboratoriais de suporte, não há regra contra o estabelecimento de diferenciações baseadas na química fundamental (elementar) dos solos (Sun et al., 2020).

As descrições morfológicas têm por objetivo caracterizar ou descrever os diferentes horizontes, que variam verticalmente em um solo, devido aos processos envolvidos em sua formação. Estes estudos vão retratar características inerentes à aparência do solo in situ, segundo as características visíveis a olho nu ou perceptíveis ao tato, como na pesquisa de Nascimento et al., (2015), que se utilizou de tradagens e trincheiras, associadas a outras técnicas, para a descrição de perfis de solo em um sistema fluvial do Pantanal brasileiro.

A cor é uma das características mais importantes para o Sistema Brasileiro de Classificação dos solos (no qual se utiliza a Carta de Munsell), mas não é o único, pois nas descrições morfológicas leva-se em consideração a textura, a estrutura, a consistência, a espessura, o tipo de transição entre os horizontes e a paisagem na qual o solo se situa (superfície do terreno é plana, ligeiramente inclinada ou muito inclinada, se a vegetação presente é cobertura natural e qual a sua classe, ou os tipos de uso como pastagem, agricultura etc.).

Segundo Carney e Johnston, 2016, a radiometria é a ciência que mensura a interação da radiação eletromagnética com um alvo através de técnicas radiométricas. A grandeza quantificada no processo é a energia radiante (Q), a partir da qual são derivadas as demais grandezas, como: radiância (L); irradiância (E); fluxo radiante (f); exitância (M) intensidade radiante. A

radiometria envolve a medição da energia radiante total emitida pela fonte sobre todo o espectro óptico que compreende a faixa espectral de 1 nm a 1000 μm , sendo que a espectrorradiometria estará relacionada com a emissão espectral de uma fonte radiante qualquer. Medidas radiométricas realizadas a partir de espectrorradiômetros portáteis ou mantidos em ambiente controlado, operam em faixas espectrais estreitas e numerosas como é demonstrado na Figura 36.

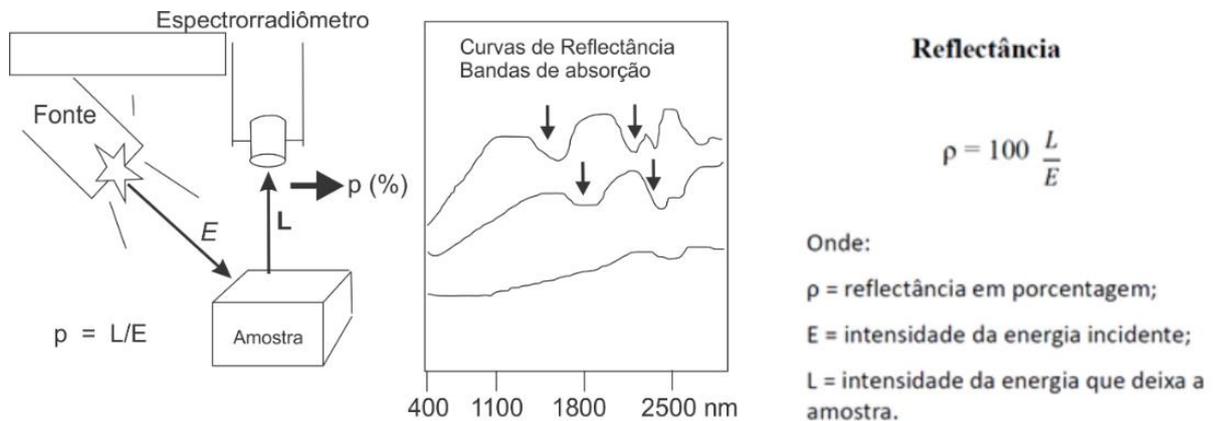


Figura 36. Esquema ilustrando a espectrorradiometria. Fonte: Meneses, 2001.

O uso de espectrorradiometria para definir propriedades do solo como pH, condutividade elétrica, carbono orgânico, argila, silte, areia, soma de bases, capacidade de troca de cátions, ferro total, além de características de fertilidade como ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn), utilizando-se de ondas, cuja a faixa espectral variam entre o visível, o infravermelho próximo e o infravermelho médio, apresentando resultados com diversos graus de confiabilidade (Lamine et al., 2019; Cezar et al., 2019; Rodrigues et al, 2019).

A quantificação de atributos do solo através de sua curva espectral é baseada nas características que envolvem a absorção de energia eletromagnética, em níveis ou em intervalos específicos da curva, uma vez que, diferentes quantidades de determinados elementos presentes no solo podem aumentar ou diminuir a reflectância espectral em comprimentos de onda específicos do espectro eletromagnético (Nanni, 2006). Para Rodrigues et al. (2019), o uso da espectrorradiometria utilizado na determinação das propriedades químicas, físicas e mineralógicas do solo, gerou resultados favoráveis quando investigado na região espectral visível (VIS: 400-700 nm).

A radiometria permite a caracterização espectral de objetos e a calibração precisa de sensores remotos através de ensaios espectrorradiométricos controlados em laboratório, diferindo-se da fotometria, que se refere apenas à porção do espectro óptico a que o olho humano é sensível (380 nm a 780 nm) (SCHNEIDER & YOUNG, 1998). Sendo assim a técnica gera melhores resultado com auxílio de imagens hiperespectrais, que contém um número de bandas superior as demais.

Segundo Vasconcelos et al., (2012) os atributos mais utilizados para a classificação automatizada são embasados na altimetria e produtos provenientes de sua derivação, como: primeira derivada (declividade e aspecto) e segunda derivada (curvaturas). Entre estes atributos de terreno, a altimetria caracteriza-se por ser uma superfície suavizada evidenciando fragmentos homogêneos relativamente maiores que a declividade e a curvatura. A declividade representa a taxa de variação espacial da altimetria que permite salientar as quebras no relevo.

Já as curvaturas apresentam uma taxa de variação espacial da declividade ou aspecto evidenciando um detalhamento das informações anteriores. Portanto, os atributos de terreno provenientes da derivação da superfície devem ser considerados separadamente por representar feições em escala e detalhamento distintas.

A classificação por árvore de decisão, que foi disponibilizada a partir do ENVI 4.0, é uma técnica que executa a categorização através de um processamento envolvendo múltiplas etapas, através de uma série de decisões binárias para alocação de pixels. Cada decisão separa pixels, pertencentes à um arranjo de imagens ou características, dentro de duas classes, baseadas em uma expressão. Para cada nova classe é possível subdividi-la em mais duas classes, ou seja, pode-se definir tantas classes quanto forem necessárias para gerar a classificação. Uma outra vantagem é a possibilidade de unir dados provenientes de diferentes origens para produzir uma única decisão do classificador em árvore. Qi e Zhu (2003), demonstraram que árvores de decisão apresentam boa acurácia de predição de atributos ou tipos de solos alta em relação a outros métodos.

A informação multiespectral pode ser usada em conjunto com dados referente ao modelo de elevação digital (DEM), com o intuito de encontrar áreas sujeitas a processo de erosão do solo, ou seja, zonas que apresentam um baixo índice de vegetação associada a uma acentuada declividade, podendo-se combinar características como declividade, altitude e aspecto para determinar ou definir classes pedológicas como no caso desta pesquisa, que se valeu dos dados adquiridos em campos para validar esta metodologia semiautomática de mapeamento.

Materiais e Métodos

Área de Estudo

A região abrange uma área de 176.324,33 hectares, localizada no município de Mambaí - GO, porção nordeste do estado, a uma distância de 509 Km de Goiânia e 301 Km de Brasília fazendo fronteira com a Bahia, delimitado pela escarpa da Serra Geral de Goiás. A APA Nascentes do Rio Vermelho é uma unidade de conservação de uso sustentável criada em 2001, afim de se proteger e conservar o patrimônio espeleológico e garantir a manutenção dos recursos hídricos.

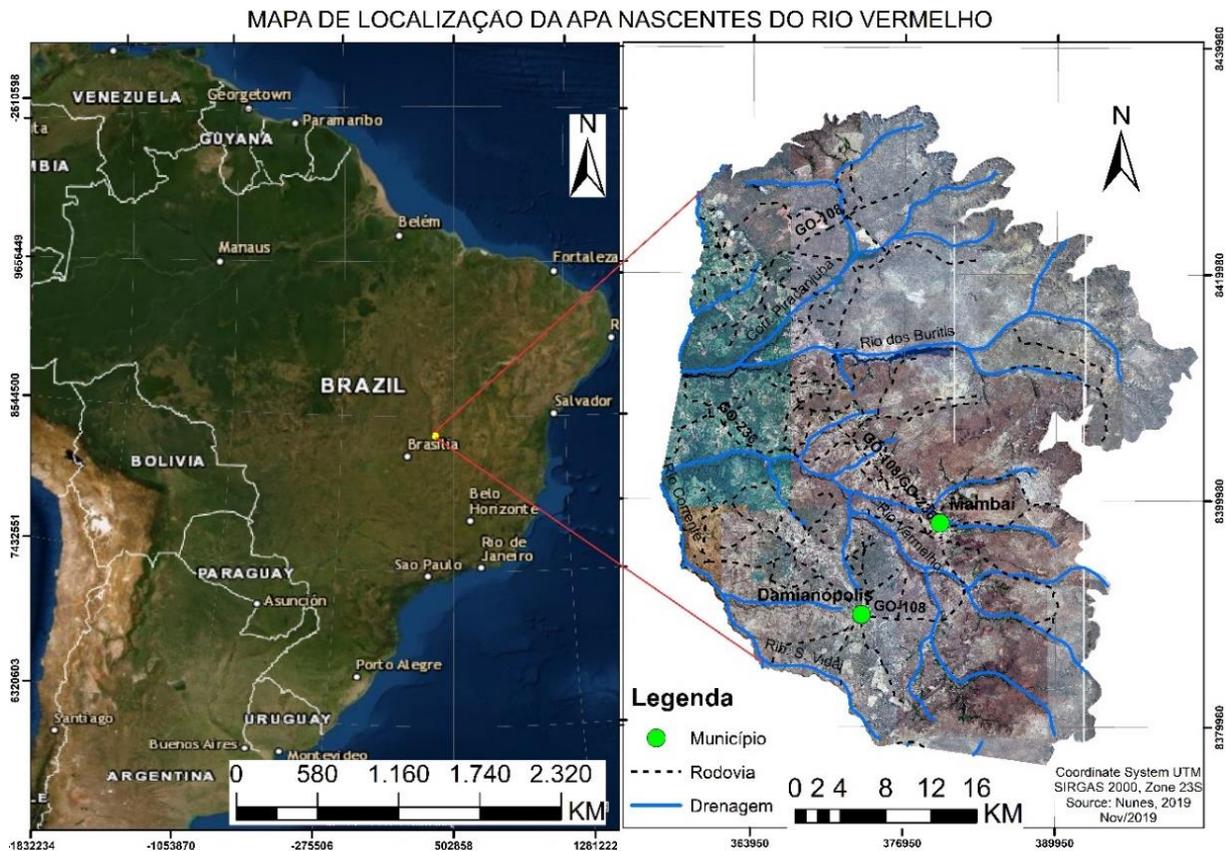


Figura 37. Mapa de localização da APA NRV.

A APA apresenta características físicas retratadas em domínios de clima tropical, com duas estações definidas, uma fria e seca, e outra quente e úmida. A área está compreendida na Bacia Hidrográfica do Rio Corrente, apresentando duas drenagens principais, Rio Vermelho na porção sul, e o Rio Buritis na porção norte.

A vegetação presente é o cerrado. O contexto geomorfológico é descrito por Cherem e Varajão (2014), apresentando duas compartimentações separadas por uma cuesta. A porção superior (Chapadão Central) é um remanescente da superfície Sulamericana representada pelos arenitos do Grupo Urucuaia, apresentando sedimentos siliciclásticos inconsolidados, e a porção inferior (Vão do Paramã) remanescente da superfície Velhas, representada por rochas do Grupo Bambuí, mais especificamente a Formação Lagoa do Jacaré, compostas por carbonatos intercalados com rochas pelíticas, onde se concentram 150 cavernas catalogadas junto ao CECAV/ICMBio (Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas).

O mapeamento indireto de áreas extensas, em tempo hábil e baixo custo. Através da utilização de diferentes metodologias, pode ser facilitado ao se integrar diferentes geotecnologias disponíveis no mercado. De forma que se esperava que a espectrorradiometria fosse capaz de agrupar os materiais coletados, que ajudaram no entendimento geomorfológico, buscando a compreensão do desenvolvimento do solo em uma topossequência, podendo fazer inferências da situação dos contatos entre as litologias e indiretamente confirmar como cada pedon analisado se comporta na topossequência. O software de integração entre as geotecnologias e os dados de campo é o Envi 5.3, que permite a conversão de dados adquiridos em variáveis dentro de uma equação de solos.

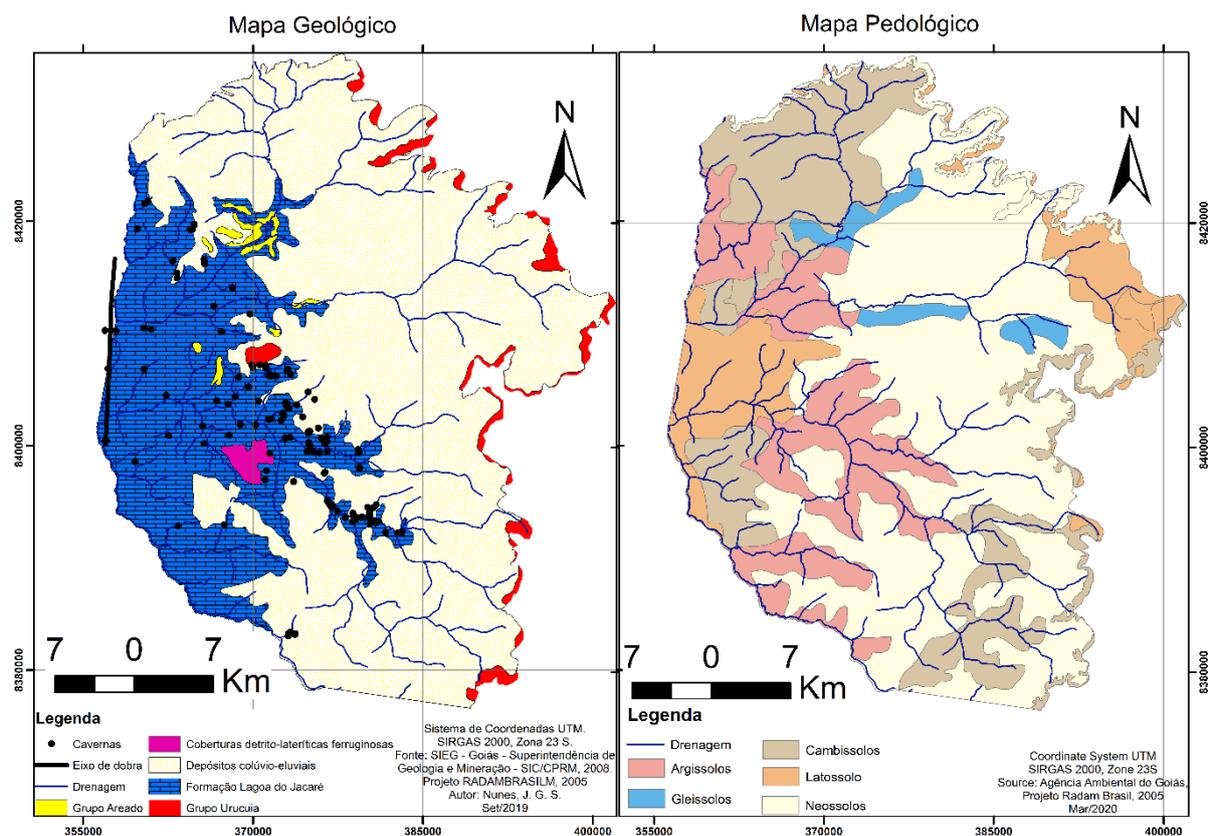


Figura 38. Mapa geológico elaborado com a base de dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), e pedológico elaborado a partir da base de dados do SIEG-GO da APA NRV.

As atividades de campo, juntamente com estudos bibliográficos confirmaram a presença de algumas litologias do Grupo Uruçuia, como a Formação Posse, apresentando basicamente arenitos de matriz quartzosa fina, cor esbranquiçada e grandes estratificações cruzadas típicas de ambiente de deposição eólica. Sobreposta a esta, encontra-se a Formação Serra das Araras apresentando arenitos avermelhados com morros testemunhos suportados por camadas espessas de couraças lateríticas, com composição avermelhada que indica a presença de argilas e os clastos arredondados, apontando transporte fluvial. Estas formações foram previamente descritas por Campos e Dardenne, (1997). No Grupo Bambuí, a partir da erosão ocorrida na Formação Capacete, os arenitos do Grupo Areado e grande porção de pelitos e carbonatos da Formação Lagoa do Jacaré foram exposto à superfície (CAMPOS & DARDENNE, 1997).

O mapa apresentado na Figura 38 apresenta informações da base de dados do Sistema Estadual de Estatística e Informações Geográficas do Estado do Goiás (SIEG). As informações pedológicas foram obtidas da Agência Ambiental do Goiás (atualizadas do programa RADAMBRASIL), quanto à geologia, as informações foram adquiridas no SIG-Goiás - Superintendência de Geologia e Mineração – SIC/ CPRM, 2008. A compartimentação pedológica se deu com base na geológica local, isto é, as classes de Argissolos e porções de Latossolos foram enquadradas nos domínios das rochas carbonáticas da APA, enquanto que os Neossolos foram enquadradas nos Grupos Uruçuia (Formação Posse e Serra das Araras) e, em menor proporção, no Grupo Areado (colúvios-eluviais). Os mapas base da Figura 38 auxiliaram no planejamento inicial de campo, ajudando na escolha dos locais de tradagens e trincheiras para confirmação dos materiais pedológicos e litológicos.

Após as revisões bibliográficas, deu-se início a etapa campo, subdivida entre coletas de solos, e descrições morfológicas. Esta etapa serviu como suporte para a criação das equações atribuídas às árvores de decisões.

Para que as coletas de solo abrangessem todas as classes pedológicas presentes na APA NRV, foram utilizados além dos mapas bases, critérios visuais e físicos de classificação como cores, granulometria, agregação, posição na encosta e forma de relevo. As técnicas convencionais de mapeamento de solo ainda são uma das principais fontes de dados para modelagem ecológica, pesquisa de mudanças climáticas e simulação de bacias hidrográficas. De forma que os dados coletados serviram para alimentar o modelo de mapeamento indireto (Liu et al., 2020).

A etapa campo possibilitou o reconhecimento da área, fornecendo informações necessárias para a compartimentação da área, como também para a determinação das classes de solo. Esta etapa forneceu o material necessário para diagnósticos obtidos nos ensaios granulométricos, de fertilidade e espectrorradiométricos, além das descrições morfológicas que são a principal fonte de categorização do solo.

Em duas campanhas de coletas, sendo a primeira ao longo da Bacia do Rio Vermelho, foram coletadas amostras de solo em 28 pontos, com auxílio de um trado manual, para que se alcançasse as profundidades de 00-20cm, 20-40cm e 60-80cm.

Em uma segunda amostragem espacial dos solos, foram visitados 94 pontos na região da APA NRV, realizando-se coletas superficiais (00-20cm) do material pedológico, para a criação de uma biblioteca espectral. Pois esta metodologia permite a detecção hiperespectral remota de solos de diferentes domínios, e auxiliam no desenvolvimento de calibrações robustas para previsão multivariada de propriedades do solo aplicáveis em escala regional e global a partir de imageadores hiperespectrais (Nocita et al., 2015). Além disso, as bibliotecas espectrais de solo permitem a identificação de alterações espectrais temporais nos locais de amostragem, ajudando a revisar configurações espectrais de sensores orbitais e aéreos recentes (Chabrilat, et al., 2019).

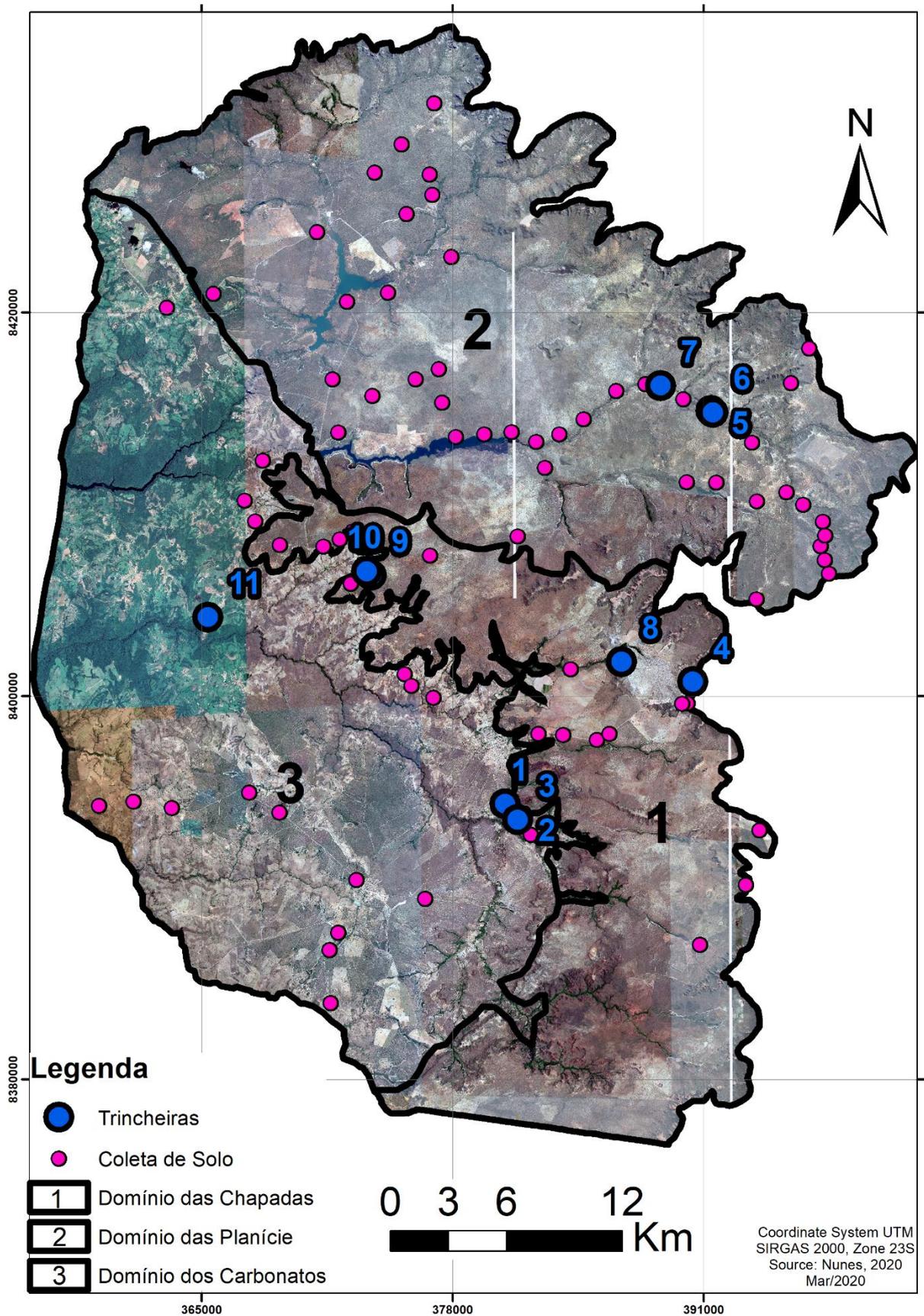


Figura 39. Imagem da compartimentação da APA NRV, seguido da localização dos pontos de coletas e descrições morfológicas.

Depois de estabelecidas as formações pedológicas da Apa NRV, foram realizadas descrições morfológicas conforme estabelecido pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, EMBRAPA, 2018). Estudos envolvendo a caracterização das classes de solos são fundamentais para elucidar dúvidas relativas ao comportamento físico, químico e morfológico dos materiais pedológicos. Fatores como a topografia e a posição da paisagem auxiliam na classificação do solo, sendo relevantes pois influenciam na pedogênese (Rodolfo et al., 2015).

As descrições *in situ* foram desenvolvidos em perfis previamente limpos de materiais transportados e alterados pelo intemperismo superficial, seguida da definição dos horizontes pedológicos. Em cada horizonte estabelecido foram realizadas classificações visuais de cores baseada na Carta de Munsell, testes de estruturas (grau, tamanho e forma), consistência, quantidade e tamanho de poros, tanto para o solo seco quanto úmido. Também foram realizadas descrições embasadas na análise da topografia do terreno, e a presença de raízes. As amostras de solo coletadas nos horizontes das trincheiras foram submetidas ao TFSA (Terra fina seca ao ar), a ensaios granulométricos e de fertilidade. Foram verificados o PH, quantidade de matéria orgânica, complexos sortivos, relações entre os cátions básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+), a atividade das argilas e micronutrientes. A classificação granulométrica foi efetuada com base nas frações da terra fina seca ao ar (TFSA), e classificadas segundo o triângulo textural.

Como informação complementar, foi criada uma biblioteca espectral dos solos superficiais coletados na Apa NRV, utilizando-se do espectrorradiômetro Fieldspec 3 e do software Envi 5.3. As curvas espectrais serviram para o agrupamento das amostras de solos dentro das classes observadas nas descrições morfológicas e confirmadas através das análises de fertilidade.

Para a elaboração da árvore de decisão e classificação dos solos, foram testados dois Modelos de Elevação Digital de Terreno (MDT), uma imagem SRTM (resolução de 30m) e outra Alos Palsar (resolução de 12,5m) (Figura 40). Apesar da segunda fornecer melhor resolução espacial, a sua resolução vertical é inferior à segunda, além de ser uma imagem que já passou por diversos tratamentos, o que influencia diretamente na finalidade pretendida com o geoprocessamento.

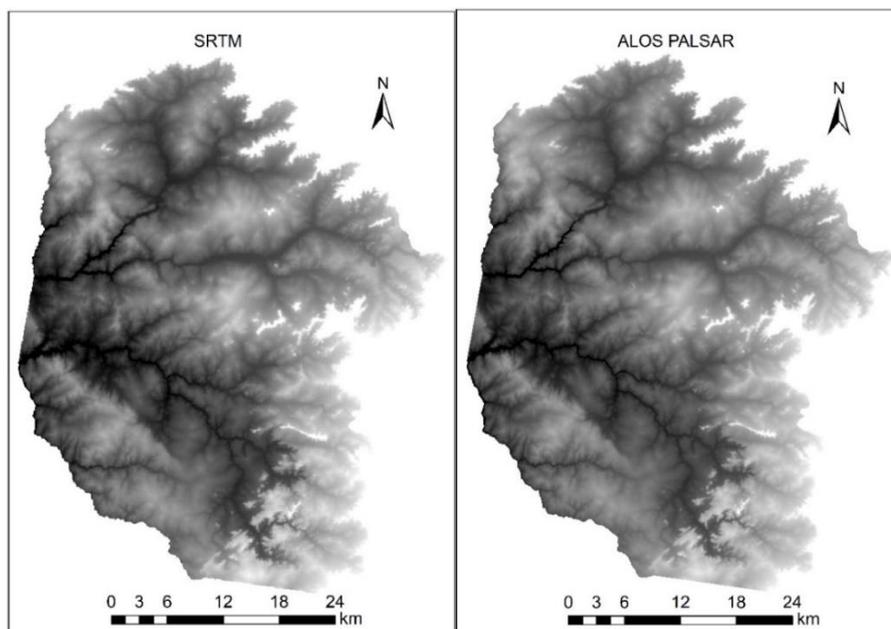


Figura 40. Modelos de Elevação digital de Terreno testados para a elaboração da árvore de decisão e classificação automática do solo.

Para a elaboração da árvore de decisões foi usado o ENVI 5.3, através da metodologia proposta por Vasconcelos et al., (2012), afirmando que uma composição colorida permite sintetizar em uma imagem diferentes informações morfométricas. Segundo o autor a classificação por árvore de decisão estabelece uma regra hierárquica e binária de partição dos valores de atributos de terreno.

A imagem SRTM serviu como base para a extração da elevação, da declividade e do aspecto, com auxílio do ArcGis 10.5, visando gerar uma composição colorida (RGB) no Envi 5.3, na qual a elevação compôs a banda R, a declividade representou a banda G e o aspecto integrou o B.

Baseando-se nas imagens obtidas da área, e nos dados de campo, foi feita uma compartimentação da APA em três regiões (Figura 39), com características homólogas, afim de melhorar a aplicação das equações elaboradas, para alimentar a árvore de decisão. Os aspectos levados em consideração foram litológicos, como no domínio dos carbonatos, e geomorfológicos, representados pelo domínio das planícies e dos relevos residuais, suportados por carapaças lateríticas. Esta compartimentação é baseada em conceitos de evolução da paisagem, levando-se em consideração critérios que incluem morfologia (forma), genética (processo), composição e estrutura, cronologia, associações de sistemas ambientais (cobertura do solo, pedologia e ecologia), bem como relações topológicas espaciais de características da superfície (formas de relevo), (Bispo et al., 2012). Também foram tomados como referência as observações e os dados de campo

O domínio das planícies é caracterizado pela presença de Neossolo Quartzarênico em abundância, com relevo plano a suave ondulado na maior parte de sua extensão, a presença de lateritas neste domínio é baixa. A litologia que aparece com maior frequência nesta região são as rochas da Formação Posse.

O domínio dos relevos residuais é marcado pela maior expressão de Latossolos, como também de lateritas que dão suporte a maior parte das colinas e chapadas presentes nesta região. As rochas da Formação Serra das Araras são as mais expressivas nesta região.

O domínio dos carbonatos é visualmente marcado por grandes lineamentos regionais, devido aos planos de fraturas das rochas da Formação Lagoa do Jacaré, composta por carbonatos intercalados com siltitos. As cavernas, dolinas e cânions estão concentradas na fronteira destes domínios com os outros delimitados.

As áreas compartimentadas foram classificadas através de árvores de decisão (Figura 41) (ferramenta disponível no ENVI 5.3), elaborando-se uma equação para cada classe de solo (Tabela 7), nas quais as variáveis das equações são compostas por parâmetros físicos que incluem a elevação, a declividade e o aspecto. Os parâmetros físicos foram confirmados pelos dados de campo, incluindo as coletas e as descrições, para que o mapa se aproximasse da realidade pedológica observada na Apa NRV. As equações não apresentam complexidade, mas fatores como ordenamento dos solos influenciam na área classificada, e por isso houve a necessidade de compartimentação morfológica. Devido à limitação instrumental, a equação dos Organossolos não compôs as árvores de decisão, mas sua equação serviu como base para a delimitação manual destes solos no Arcgis 10.5.

Tabela 7. Tabela das equações do solo para o domínio morfológico das Chapadas, na qual o parâmetro B1 é a elevação, B2 a declividade e B3 é o aspecto.

Solo	Equação
Neossolo Litólico Urucuia	B1 LT 900 AND B2 GT 8
Cambissolo Urucuia	B1 LT 940 AND B2 GT 6
Latossolo	B1 GT 825 AND B2 LT 6
Neossolo Quartzarênico	B1 GT 730 AND B1 LT 900 AND B2 LT 7
Neossolo Litólico Bambuí	B1 GT 504 AND B1 LT 735 AND B2 GT 7
Cambissolo Bambuí	B1 GT 500 AND B1 LT 735 AND B3 LT 0
Chernossolo	B1 GT 500 AND B1 LT 735 AND B2 LT 7
Organossolo	B1 GT 715 AND B1 LT 740 AND B2 LT 3

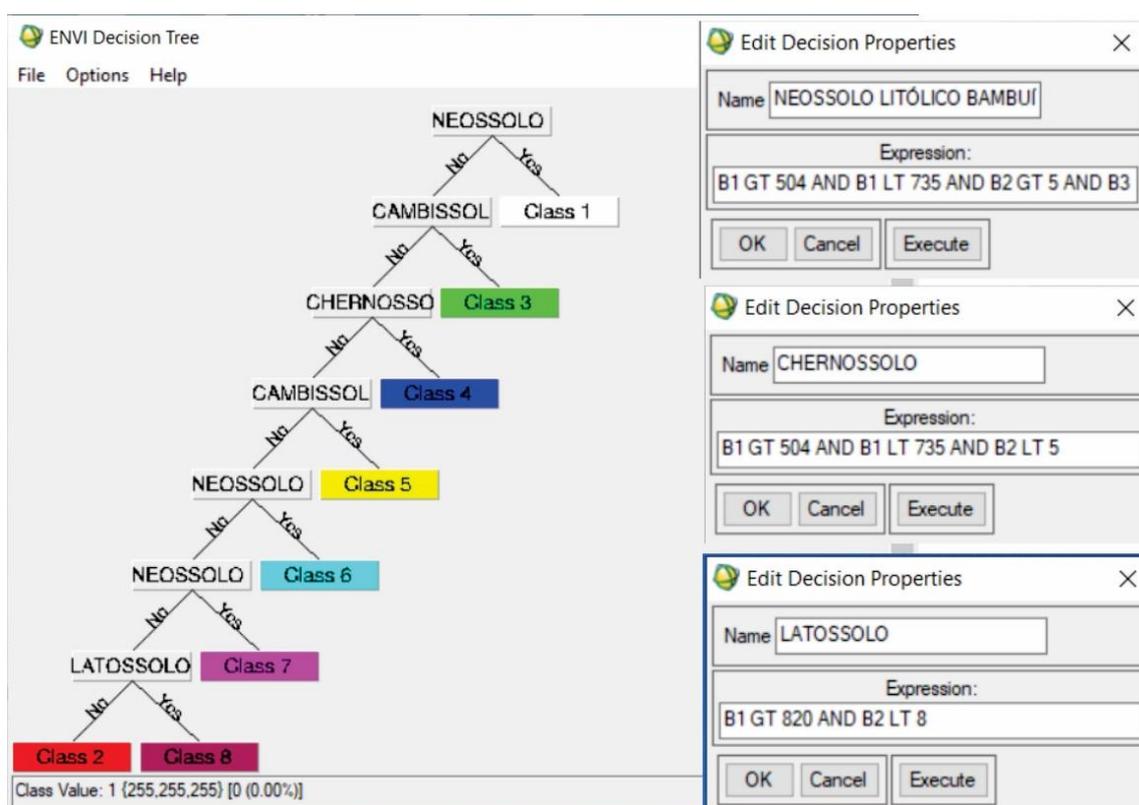


Figura 41. Ilustração da árvore de decisão com algumas das equações elaboradas para a classificação do Neossolo Litólico, Chernossolo e Latossolo.

As etapas foram executadas na ordem proposta por questões de interdependência entre as fases. As primeiras etapas forneceram suporte teórico, ou serviram como base de dados para as seguintes como está demonstrado no fluxograma da Figura 42. Como as informações da árvore de decisão foram subtraídas de um MDT (SRTM) que apresenta resolução espacial e vertical de 30m, levou-se em consideração as análises de campo para delimitar os contatos dos solos nas equações, como também os perfis de descrição morfológica, já os pontos de coleta superficial serviram como confirmação das informações por fotos ou por comparação direta entre as curvas espectrais.

Com a aquisição de dados em campo, e posteriormente com as análises laboratoriais buscou-se uma integração das informações para a elaboração de um mapa de solo que contemplasse a

realidade da Apa NRV. A ferramenta de ligação das informações foi software ENVI 5.3, com a possibilidade de criação das equações que abasteceram as árvores de decisão, mas todas as etapas que antecederam o mapa de solos foram importantes para a confirmação das informações que foram convertidas em valores que integraram as equações (apresentadas na Tabela 7).

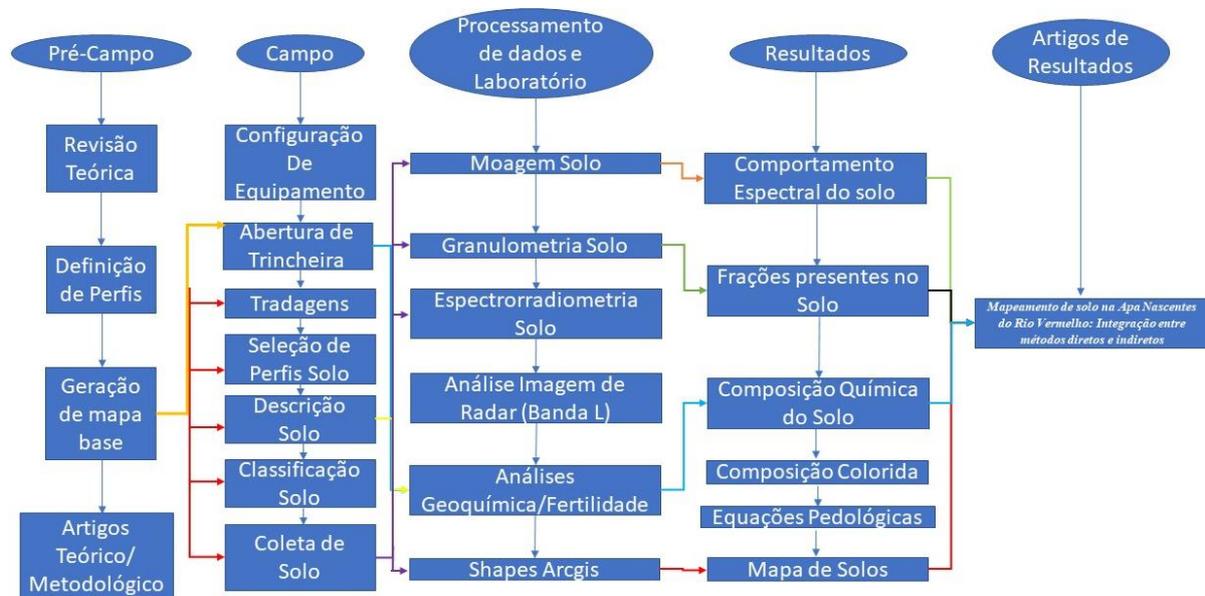


Figura 42. Fluxograma das etapas de elaboração da pesquisa.

Resultados e Discussões

O material pedológico foi classificado segundo o SiBCS, Embrapa, 2018, e categorizado dentro das classes de solos existentes. Foram descritos na região da Apa NRV seis classes de solos, mas como algumas destas classes foram geradas a partir de diferentes materiais de origem, foram individualizadas pela litologia exposta.

Os Latossolos (Figura 43 C) segundo a SiBCS, Embrapa, 2018, são solos que passaram por processos longos e intensos de intemperização, marcado pela presença de um horizonte Bw, com abundância em óxidos de ferro, alumínio, e argilas de baixa atividade. Na região de estudo o solo apresenta cor vermelho-amarelo, textura média, grau moderado, forma granular com blocos subangulares, consistência macia quando seco e friável quando úmido, com poros de variados tamanhos, e a topografia do relevo é plano. Normalmente estão associadas as chapadas (Figura 44 A), em cotas do terreno acima de 740m de elevação.

Os Organossolos (Figura 43 F) são diagnosticados por um horizonte hístico, devendo apresentar uma espessura de ao menos 60cm, com uma composição mínima de 75% de matéria orgânica, com a saturação do horizonte C durante a maior parte do ano. Na área da Apa NRV, os Organossolos estão concentrados principalmente nas regiões de drenagens, associados a Formação Posse, os relevos variam de plano a suave ondulado. Eles são associados a áreas de drenagem principalmente nos locais onde a Formação Posse é aflorante, em cotas sem muitos desníveis do terreno, entre 720m e 740m.

Os Neossolos Quartzarênicos (Figura 43 D) são pouco evoluídos, constituídos por material mineral e menos de 20 cm de material orgânico, sem nenhum horizonte B diagnóstico. Na região da Apa NRV eles são formados a partir de duas litologias, a Formação Posse (Figura 44

B) composta por arenitos esbranquiçados, com estratificações cruzadas decamétricas, exposto principalmente em áreas de depressões periféricas ou nas Cuestas. A outra litologia associada a estes solos é o Grupo Areado (Figura 44 D), composto por arenitos amarelados, com ou sem presença de laterita (quando presentes as lateritas são menores que as da Formação Serra das Araras). Eles apresentam cor variável em ter amarelado ou esbranquiçado de acordo com a litologia, textura arenosa, blocos subangulares. consistência solta, sem plasticidade ou pegajosidade, e estão posicionados em relevos que variam de plano a ondulado.

Os Neossolos Litólicos (ou Regolíticos) (Figura 43 E) não se diferenciam dos Quartzarênicos no que diz respeito à evolução, pois ambos apresentam baixo grau desenvolvimento in situ, mas uma característica diagnóstica deste solo é a baixa profundidade. Normalmente estes solos estão associados aos relevos mais dissecados ou íngremes, sendo mais comumente ligados aos siltitos da Formação Lagoa do Jacaré (Figura 44 E, F e G), mas também podem se forma em outras litologias, onde a declividade não permite o acúmulo de colúvio ou de solo in situ.

Os Chernossolos (Figura 43 B) são diagnosticados por um horizonte A chernozêmico, seguido por um B incipiente ou textural, ambos com argila de alta atividade e eutróficos. Na Apa NRV estes solos estão associados as rochas carbonáticas da Formação Lagoa do Jacaré (Figura 44 G), com cores variáveis (de um vermelho 7,5R 3/6, até cores mais esbranquiçadas 2,5YR 2/2). Localizados em relevos planos ou suave ondulado, em posições de meia encosta, apresentando textura argilosa, grau das estruturas muito forte, blocos subangulares, e consistência dura quando seco e firme na presença de umidade.

Os Cambissolos (Figura 43 A) representam uma classe muito variável de solos, mas que apresentam como características ausência de texturas médias ou finas e baixo desenvolvimento em relação a profundidade, com presença de fragmentos de rochas. Este tipo de solo pode estar associado a qualquer litologia presente na Apa NRV, sendo descrito em arenitos dos Grupo Urucua e em rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, em áreas escarpadas, em posição de meia encosta ou sopé.

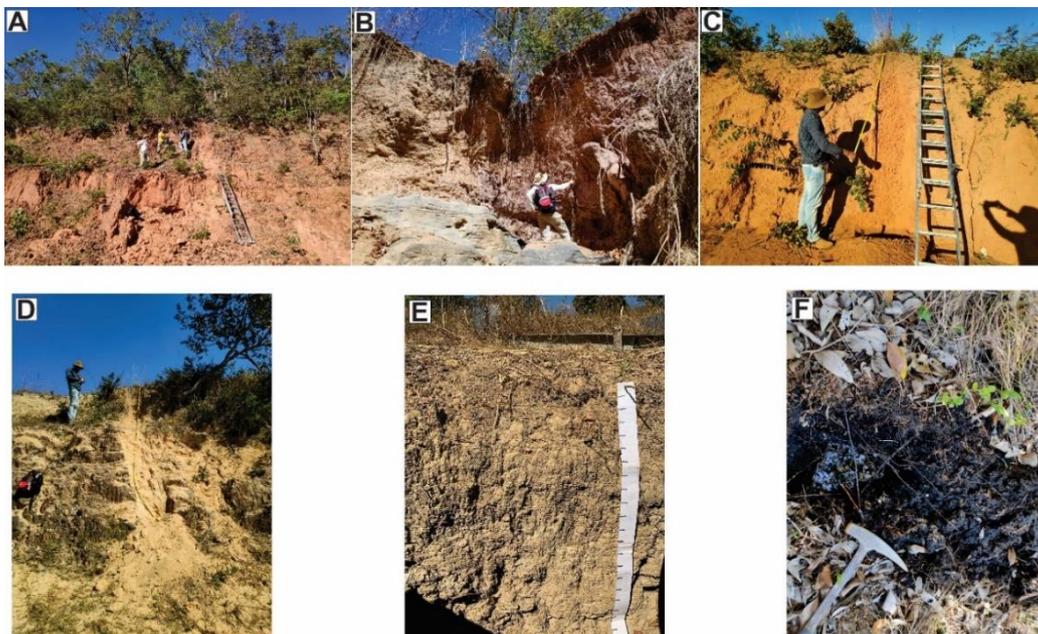


Figura 43. A) Perfil de Cambissolo desenvolvido em rochas da Formação Serra das Araras, devido ao relevo íngreme. B) Perfil de Chernossolo desenvolvido em carbonatos da Formação Lagoa do Jacaré, descrito em um perfil cavado pela erosão. C) Perfil de Latossolo desenvolvido em área de chapada da Formação Serra das Araras. D) Perfil de Neossolo Quartzarênico

desenvolvido em rochas da Formação Posse. E) Perfil de Neossolo Litólico, desenvolvido em Siltitos da Formação Lagoa do Jacaré. F) Perfil de Organossolo, desenvolvido em Fundo de vale, sobre rochas da Formação Posse.

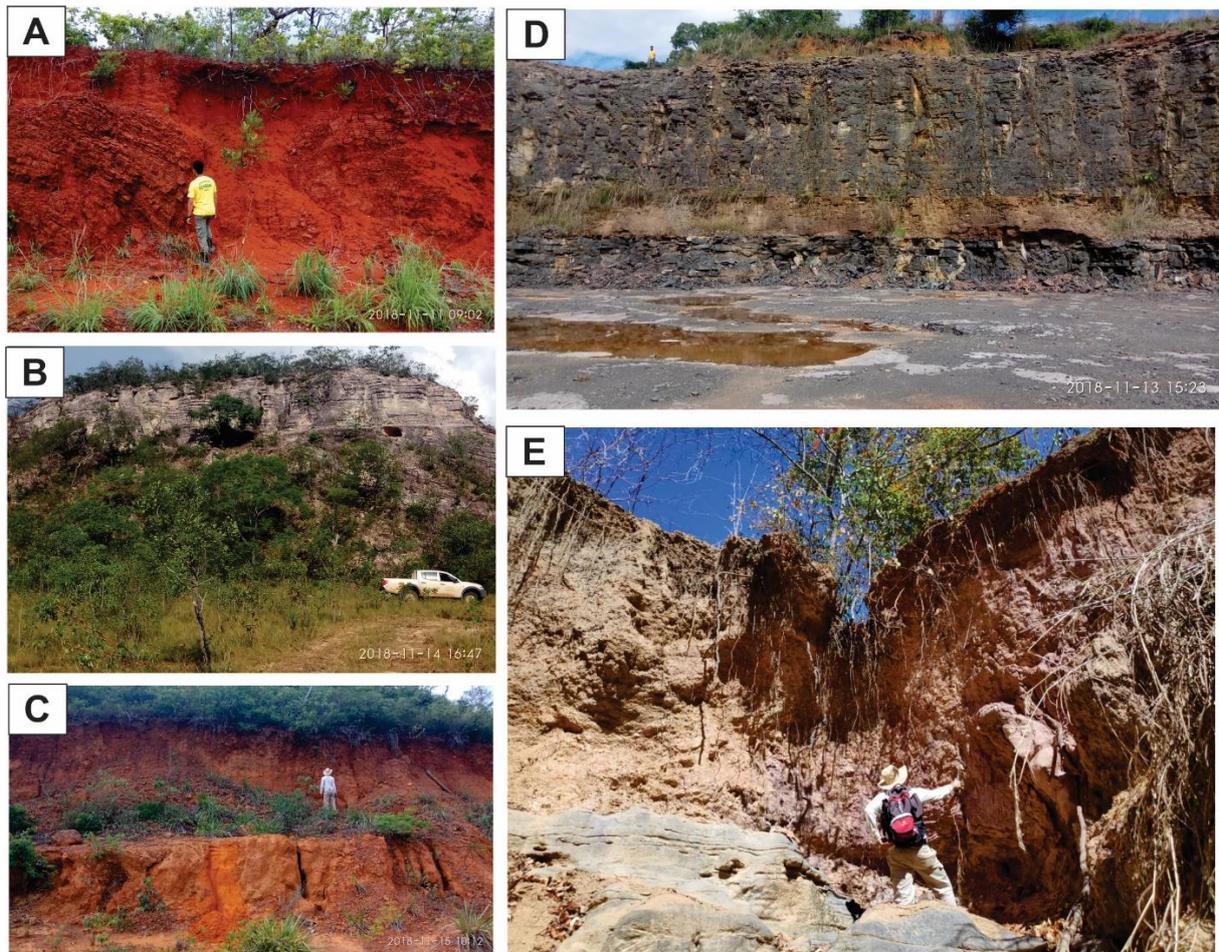


Figura 44. A) Serra das Araras Formation; B) Posse Formation; C) Areal Group; D) Lagoa do Jacaré formation (Limestones and Claystones); E) Acrisols and Claystone outcrop.

Com base nas informações obtidas em campo foi elaborado um perfil representativo dos solos (Figura 45), cada qual acompanhando a litologia que fornece o material de origem, quando desenvolvido in situ. Mas levando em consideração que o nível de base são as drenagens principais, seria mais adequado representar o desenvolvimento dos solos em dois perfis.

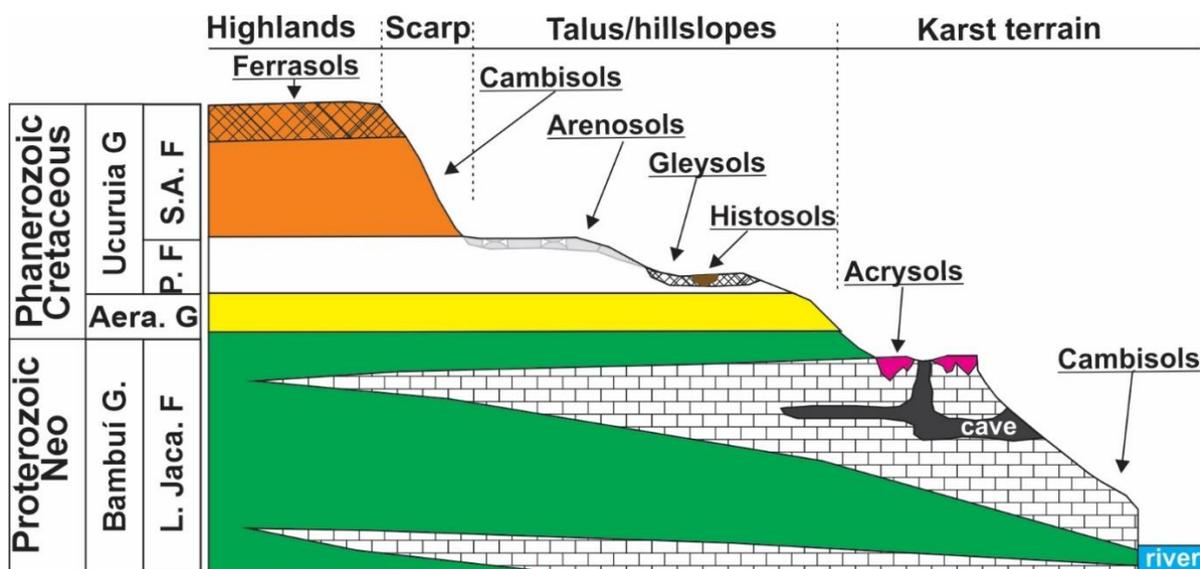


Figura 45. Sequência estratigráfica das litologias encontradas na Apa NRV associadas aos solos subjacentes.

As análises de fertilidade do solo possibilitaram o diagnóstico dos Chernossolo, como também a confirmação das outras classes identificadas em campo. A Tabela 8 é uma compilação das análises laboratoriais. Outras confirmações como a composição dos Neossolos Quartzarênicos, constituídos basicamente por areia, já nos latossolos foi confirmado pela presença de argilas de baixa atividade (principalmente caulinita) e presença de óxidos (hematita e goetita). Os Organossolos apresentaram a maior quantidade de matéria orgânica (mais de 33% da composição).

Tabela 8. Dados de fertilidade e granulometria dos perfis de solo diagnósticos da APA NRV. As siglas entre parênteses S4, S7, S9, S10 e S11 correspondem a localização dos pontos em campo.

Hz	Granulometria			Classificação	C Org. Total	PH		Complexo Sortivo						Relações			CTC	V	m	
	Areia	Silte	Arg.			H ₂ O	CaCl ₂	P	K	S	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	Ca/Mg	Ca/K				Mg/K
Chernossolo (S11)																				
A	67,14	16,86	16,00	Franco - Arenoso	0,80	5,80	5,40	2,96	63,91	0,92	5,59	0,51	<0,1	1,82	11,0	34,2	3,1	8,08	77	0
AB	65,46	16,54	18,00	Franco - Arenoso	0,50	6,10	5,80	2,13	99,61	0,89	6,98	0,64	<0,1	0,91	10,9	27,4	2,5	8,78	90	0
Bt	61,66	14,34	24,00	Franco - Argilo - Arenoso	<0,2	6,30	5,80	1,81	84,67	7,00	0,65	<0,1	<0,1	0,99	10,89	32,3	3,0	8,86	89	0
BC	82,76	13,24	4,00	Areia Franca	<0,2	6,80	6,10	3,33	47,05	<0,5	2,96	0,23	<0,1	0,66	12,9	24,6	1,9	3,97	83	0
Cambissolo (S10)																				
A	44,76	30,24	25,00	Franco - Argilo - Arenoso	1,72	5,40	5,00	7,27	111,62	0,63	7,08	1,26	<0,1	2,89	5,6	24,8	4,4	11,52	75	0
Bi	51,42	24,58	24,00	Franco - Argilo - Arenoso	0,51	5,80	5,40	3,07	148,76	0,71	4,85	1,08	<0,1	1,57	4,5	12,7	2,8	7,88	80	0
BC	50,16	23,84	26,00	Franco - Argilo - Arenoso	<0,2	5,80	5,50	1,90	213,76	<0,5	5,85	1,78	<0,1	1,65	3,3	10,7	3,3	9,83	83	0
CB	43,04	28,96	28,00	Franco - Argilo - Arenoso	<0,2	6,40	5,90	2,03	276,98	<0,5	6,79	3,15	<0,1	0,99	2,2	9,6	4,4	11,64	91	0
Latossolo (S4)																				
A	82,18	3,82	14,00	Franco - Arenoso	0,40	4,70	4,10	2,97	22,34	1,66	0,30	0,13	0,34	2,72	2,3	5,3	2,3	2,72	18	41
AB	79,64	2,36	18,00	Franco - Arenoso	0,10	4,80	4,10	1,49	10,88	0,88	0,25	<0,1	0,16	1,49	2,5	9,0	3,6	1,87	20	30
BA	73,90	4,10	22,00	Franco - Argilo - Arenoso	<0,2	5,00	4,30	0,63	7,26	1,07	0,25	0,11	<0,1	1,57	2,3	13,5	5,9	1,95	19	0
BW	65,82	6,18	28,00	Franco - Argilo - Arenoso	<0,2	4,80	4,40	0,70	3,46	<0,5	0,25	<0,1	<0,1	1,40	2,5	28,3	11,3	1,76	20	0
Neossolo Quartzarênico (S9)																				
A	94,88	1,12	4,00	Areia	0,40	4,90	4,30	7,19	23,79	1,02	0,28	<0,1	0,33	2,15	2,8	4,6	1,6	2,59	17	43
A/C	94,74	1,26	4,00	Areia	0,10	4,70	4,30	2,65	9,72	0,91	0,18	<0,1	0,37	2,06	1,8	7,2	4,0	2,36	13	55
C1	93,62	2,38	4,00	Areia	0,10	4,60	4,20	1,20	11,60	0,66	0,17	<0,1	0,27	1,40	1,7	5,7	3,4	1,70	18	47
C2	93,78	2,22	4,00	Areia	<0,2	4,60	4,20	1,61	10,28	0,74	0,18	<0,1	1,26	1,16	1,8	6,8	3,8	1,47	21	46
C3	94,84	1,16	4,00	Areia	<0,2	4,70	4,10	<0,3	6,64	<0,5	0,23	<0,1	0,16	0,83	2,3	13,5	5,9	1,18	29	32
Organossolo (S7)																				
H1	INC	INC	INC	Silte	33,10	3,60	2,70	4,88	18,94	1,63	0,34	<0,1	3,75	64,52	3,4	7,0	2,1	65,01	1	88

Os dados obtidos em campo e em laboratório demonstram que as classes de solo presentes na área da Apa NRV obedecem a uma topossequência, o que colaborou para a elaboração das equações. Os MDTs possibilitaram identificar que com alívio depressão, em consequência da erosão do Grupo Urucuia, as rochas carbonáticas do Grupo Bambuí podem ter soerguido, o que explicaria a maior altitude destas rochas na porção norte da Apa. A disposição espacial do material pedológico está intimamente associada à geologia e à geomorfologia, de forma que com a compartimentação geomorfológica foi possível detalhar com a precisão fornecida pela imagem SRTM.

Os arenitos, quando sujeito ao intemperismo químico e físico se desagregam com facilidade. A situação ideal para a formação de latossolos na Apa NRV, são nas chapadas ou nos relevos residuais, que são mais comuns na porção sudeste da Apa. Uma das situações favoráveis para a sustentação de relevos residuais, é a suporte que carapaças lateríticas fornecem, este tipo de estruturação foi identificado em campo. Enquanto que na Formação Serra das Araras, os arenitos avermelhados, apresentem suas características típicas de transporte fluvial, e por este motivo conter maior teor de argila, que causa abafamento no sinal da antena. Os arenitos da Formação Posse apresentam grandes estratificações cruzadas, típicas de ambientes eólico, são constituídos basicamente por areia, mas os estratos permitem o acúmulo de minerais magnéticos, e por esta razão apresentam reflexão do sinal mais alta.

A partir das informações de campo foi possível elaborar um modelo sobre o entendimento para a formação dos níveis lateríticos, embora lateritas com colorações e formas diferentes indicando outros processos de gênese estejam presentes na região. O modelo foi elaborado a partir de um MDT, e com base na localização de um paleocanal que tornou possível inferir o nível dinâmico do lençol freático.

As classes de solo identificadas acompanham os limites litológicos como também o relevo. Estas observações constatadas em campo, foram transformadas em informações numéricas através das equações dos solos.

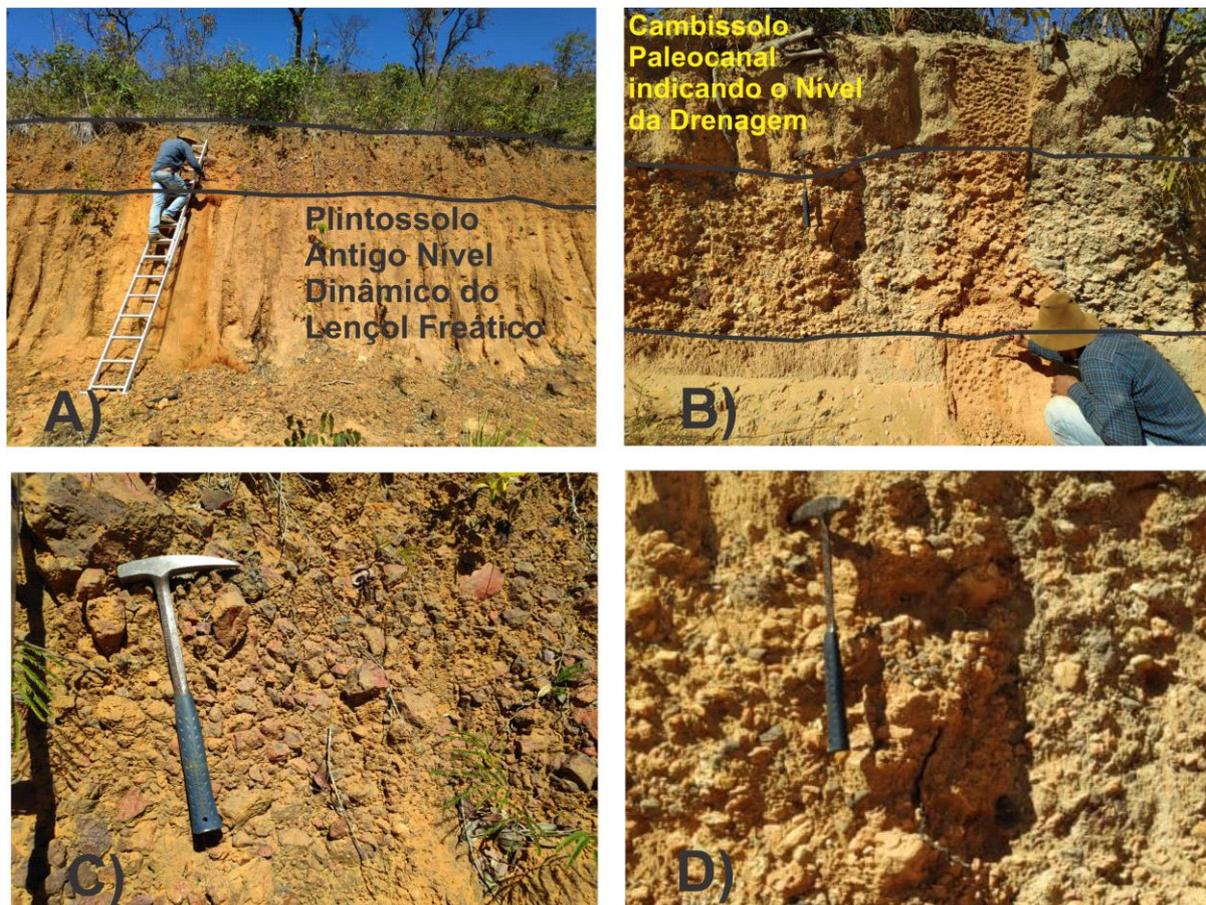


Figura 46. A) Antigo nível dinâmico do lençol freático, registrado pelo nível laterítico. B) ilustração do paleocanal. C) Imagem de detalhe do nível laterítico. D) imagem de detalhe do paleocanal.

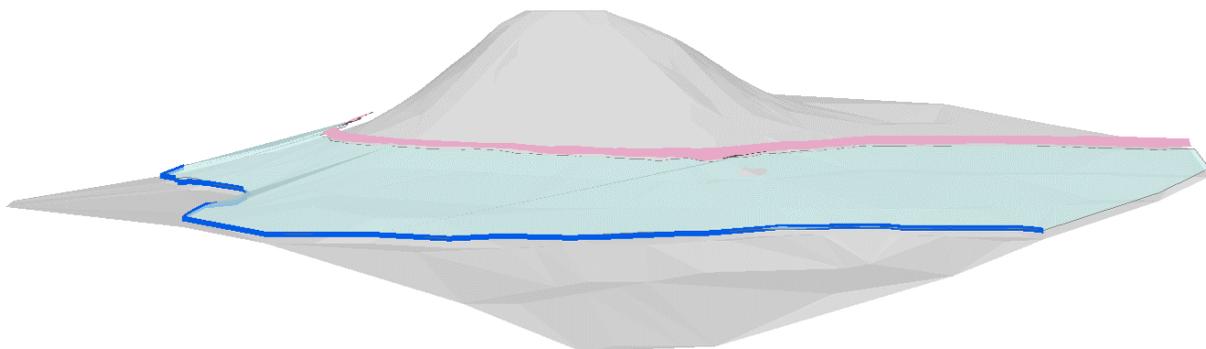


Figura 47. Situação do paleocanal e lençol freático, contribuindo para a gênese de lateritas que dão suporte aos relevos residuais da região.

Os elementos presentes no solo apresentam diferentes faixas de refletância os espectros de 350 a 1000 nm estão relacionados às interações da radiação eletromagnética com os óxidos e hidróxidos de ferro o intervalo de 480 a 530 nm está relacionado respectivamente a goethita e hematita A faixas de 1400 a 1900 nm estão relacionadas à presença de água O pico acentuado em 2200 nm pode indicar a presença de caulinita, o produto de alteração de feldspatos, feldspatóides e outros silicatos A faixa de 2300 a 2500 nm das amostras apresentam comportamento espectral semelhante.

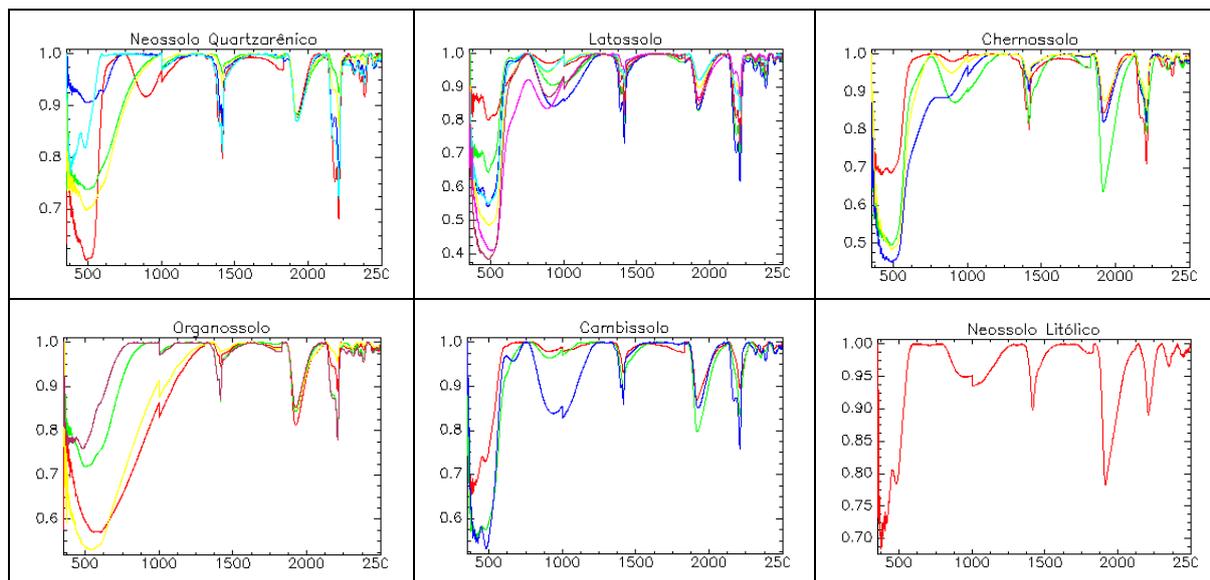


Figura 48. Curvas espectrais com a remoção do contínuo, dos solos da área incluindo Cambissolos, Chernossolos, Neossolos, Latossolos e Organossolos, com a definição dos picos de reflexão para óxidos de ferro, água e alguns silicatos. É possível identificar que os argissolos tem maior quantidade de óxidos, capacidade de absorver água e quantidade de outros minerais silicatos, já os Neossolos apresentam as três características reduzidas.

As curvas espectrais dos solos, embora apresentem similaridades nos picos, podem ser diferenciadas através de observações básicas. Para se entender e interpretar estas curvas dos solos é necessária uma compreensão da composição base do material pedológico. Para os solos ricos em óxidos de ferro como os Chernossolos da área em questão, deverá ocorrer um pico de absorção no intervalo do Visível ao Infravermelho Próximo, originadas basicamente das transições eletrônicas de transferência de carga e de campo cristalino. Nos gráficos gerados com a remoção do contínuo, estas respostas aparecem em 2 picos de absorção (profundidade da curva ou concavidade), o primeiro no intervalo de comprimento da onda que vai de 450 nm até 550 nm (eixo X), e um segundo pico que vai do intervalo de 900 nm a 1000 nm (eixo X).

Com base em informações nas curvas dos Chernossolos, o eixo Y (refletância normalizada), os dois picos correspondentes aos óxidos alcançam respectivamente 0,5 e 0,9 (obs: não tem unidade, mas representa o valor de refletância direcional (ρ)) (a característica principal destes solos é banda intensa e larga centrada em 950 nm, uma centrada em 650 nm e outra entre 450 e 530 nm). Para os latossolos os mesmos picos alcançam 0,4 e 0,85 (eixo Y), já os Neossolos apresentam apenas o primeiro pico que alcança o valor médio de 0,7, o segundo pico é desprezível (característica principal a forma convexa no intervalo espectral de 400 a 1300 nm).

Uma das contribuições desta etapa, foi a possibilidade de se agrupar os solos coletados em campo, dentro das classes diagnosticadas através das descrições morfológicas, e ensaios de fertilidade, baseado nas observações dos picos de óxidos, argilominerais e conteúdo de água.

O resultado do mapa de solo atendeu as expectativas, delimitando as classes de solo verificadas em campo com determinada precisão. Os dados de campo foram integrados às geotecnologias

de maneira adequada, permitindo que as variáveis nas equações apresentassem margens de erros pequenas em relação a realidade da área.

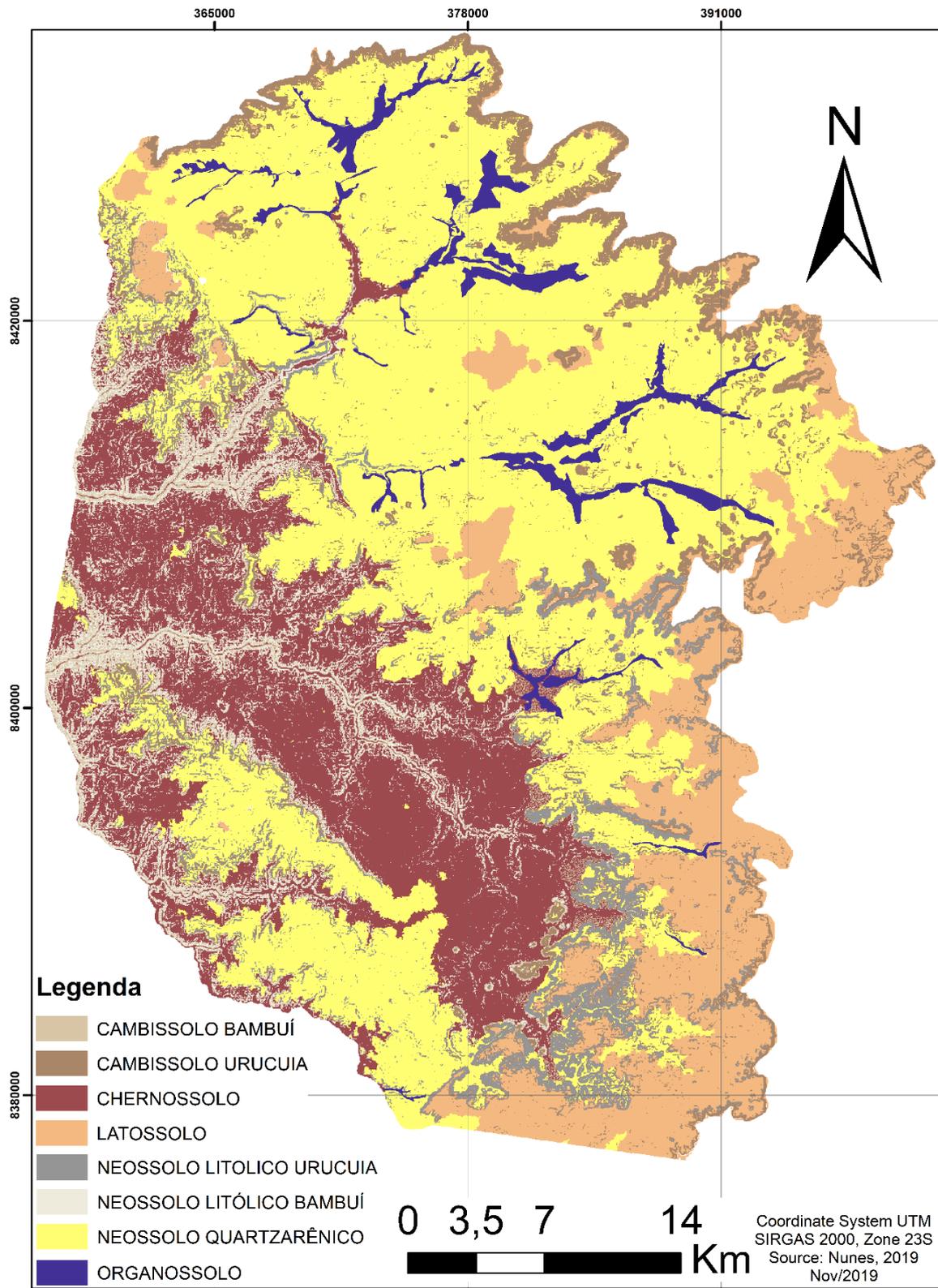


Figura 49. Mapa de solo elaborado a partir das informações de campo e laboratório, introduzidas nas equações pedológicas.

A transição das informações coletadas e geradas através dos dados tornou possível a elaboração do mapa localizado na Figura 49. O mapa em questão apresenta muitas distinções em relação ao gerado anteriormente pela EMBRAPA, a destacar pela ausência de Argissolos e presença de Chernossolos, como também pela inclusão de Organossolos.

A subdivisão em domínios morfológicos permitiu fazer adequações devidos as particularidades do relevo em cada porção. Embora os Organossolos tenham sido definidos manualmente no Arcgis 10.5, foi elaborada uma equação específica para este tipo de solo, o que permitiu maior eficácia na delimitação das áreas que correspondiam a está classe de solo.

A classificação dos solos se deu primeiramente através das descrições morfológicas, que tornaram possível identificar cinco das classes de solos mapeadas na Apa NRV. Os Latossolos descritos em perfis tradicionais, como retratado na literatura, com horizontes A, AB, BA e BW definidos em campo, seguindo os critérios da Embrapa.

Os Neossolos Quartzarênicos abrangem uma região de aproximadamente 760 Km² (43,1%), estão representados no mapa pela cor amarela, concentrados na porção nordeste da APA NRV, eles não necessitam de muitos parâmetros físicos para se desenvolver na região, já que a Formação Posse, composta basicamente por matriz eólica, contribui para a gênese deste solo com uma grande quantidade de areia fina e média. Não havendo contribuições exógenas os Neossolos Quartzarênicos constituem grandes perfis de solos, em áreas extensas na região.

Os Organossolos representam um território próximo de 48 Km² (2,7%), sendo representados pela cor azul escuro do mapa, estão localizados em domínios da Formação Posse, mais especificamente nos fundos de vale, em áreas de drenagem, onde o acúmulo de matéria orgânica é possível, formando horizontes hísticos com mais de 2m de profundidade.

Os Chernossolos abrangem uma região de 340 Km² (19,3%), e são representados no mapa pela cor coral, eles ficaram restritos aos domínios dos carbonatos, assim como os Neossolos Quartzarênicos e os Latossolos se restringiram aos domínios dos arenitos. A organização topográfica dos solos de acordo com as informações obtidas com estudo da Catena

Os Latossolos compreendem um território de aproximadamente 235 Km² (13,3%), representado pela cor laranja no mapa, eles acompanham principalmente a borda leste do mapa, localizado sobre as cotas mais altas e planas do terreno, onde se situa a Formação Serra das Araras. As equações destes solos não apresentaram alto grau de complexidade, devido as características das chapadas, localizadas nas maiores elevações e com pouca ou nenhuma declividade.

Os Neossolos Litólicos (ou Regolíticos) recobrem uma região de pouco mais de 168 Km² (9,5%), representados pelas cores cinza claro e cinza escura para diferencia o que tem como material de origem os arenitos, dos que são formados por siltitos e carbonatos, não se diferenciam dos Quartzarênicos no que diz respeito à evolução, pois ambos apresentam baixo grau desenvolvimento in situ, mas uma característica diagnóstica deste solo é a baixa profundidade. Normalmente estes solos estão associados aos relevos mais dissecados ou íngremes, sendo mais comumente ligados aos siltitos da Formação Lagoa do Jacaré, mas também podem se forma em outras litologias, onde a declividade não permite o acúmulo de colúvio ou de solo in situ. Os neossolos Litólicos e Cambissolos não são restringidos pelo

material de origem, mas sim pelas condições de relevo, podendo ser localizados em diversas porções da região, mas em baixa porcentagem em relação aos outros solos.

Os Cambissolos apresentam uma área de mais de 180 Km² (10,2%), espalhados por toda região, eles são representados pelas cores marrom claro e marrom escuro, para distinguir os que se formam nos carbonatos dos que são formados por arenitos. Eles se localizam em regiões de encostas e de relevos com declividade mais acentuada.

Considerações Finais

A utilização de geotecnologias para diversas aplicações no campo das geociências ou ciências da Terra tem sido realizada com êxito, mas a eficiência destes métodos nem sempre é satisfatória, alcançando resultados difusos ou com alto grau de incertezas. Mas a acurácia dos métodos indiretos pode ser melhorada através de associações que não são tradicionalmente executadas ou verificadas na literatura.

As descrições morfológicas foram responsáveis pelo diagnóstico das classes de solo encontradas, os critérios classificados em campo como cor, estrutura, poros e consistência, foram importantes para a correção de informações bibliográficas equivocadas e rearranjo de outros passos como pontos de tradagem. A coleta dos diferentes horizontes descritos sanou as dúvidas de campo através das análises laboratoriais.

As análises de fertilidade contribuíram para distinção química, a exemplo dos Chernossolos anteriormente classificados como Argissolos, além de trazer informações sobre a composição de macro e micronutrientes, quantidade de matéria orgânica, argilas de baixa e alta atividade e complexos sortivos presentes no solo.

A curvas espectrorradiométricas são muito úteis quando associadas a imagens hiperespectrais, mas serviram para finalidade de agrupamento dos solos coletados nos diversos pontos dentro da Apa NRV. Através de algumas curvas e das fotografias dos locais de coleta de solo foi possível fazer associações entre alguns gráficos para definição dos solos em regiões desprovidas de descrições morfológicas.

O Envi 5.3 foi eficiente na integração de dados, como também na conversão destes em informações cartográficas. O mapa pedológico final apresentou uma escala de detalhe próxima da realidade, facilitando a execução de outros trabalhos que poderão ser realizados na região. A técnica empregada para o mapeamento na APA NRV foi relativamente de baixo custo e com eficiência em relação a outros métodos disponíveis no mercado e no meio científico.

Apesar de não existir referencial teórico para a integração das metodologias aplicadas, o resultado final do mapa para a escala aplicada foi satisfatório. O emprego de geotecnologias, integrados as ferramentas tradicionais e ao SIG para confecção de mapas pedológicos podem gerar ótimos resultados, embora os solos não apresentem composição e perfis uniformes. A assimilação entre pontos de diferentes localidades pode ser agilizada através da espectrorradiometria.

O mapa de solos apresentou mudanças significativas em relação às informações dos mapas anteriores (mapa pedológico da Figura 38), e devido a compartimentação morfológica, foi possível ajustar as equações para que o mapa concordasse com todos os pontos de coleta, ainda que o SRTM apresenta apenas 30m de resolução espacial.

Referencias

- BALLABIO, C.; PANAGOS, P.; LUGATO, E.; HUANG, J. H.; ORGIAZZI, A.; JONES, A.; FERNANDEZ-UGALDE, O.; BORRELLI, P.; MONTANARELLA, L. Copper distribution in European topsoils: an assessment based on LUCAS soil survey. **Sci. Total Environ.** V. 636, p. 282–298. 2018.
- BARGAOUI, Y. E.; WALTER, C.; MICHOT, D.; SABY, N. P. A.; VINCENT, S.; LEMERCIER, B. Validation of digital maps derived from spatial disaggregation of legacy soil maps. **Geoderma** V. 356 N°: 113907. 2019. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.113907
- BISPO, M. P.; JAMES, L. A.; SHRODER, J. F.; WALSH, S. J. Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: Concepts, issues and research. **Geomorphology**, v. 137 (1), p. 5-26. 2012. doi: 10.1016 / j.geomorph.2011.06.027
- CAMPOS J.E.G & DARDENNE M. A. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. **Rev. Bras. Geoc.**, v. 27(3), p. 257-282. 1997.
- CARNEY, M. N.; JOHNSTON, W. M. A novel regression model from RGB image data to spectroradiometric correlates optimized for tooth colored shades. **Journal of Dentistry.** V. 51 p. 45-48. 2016.
- CEZAR, E.; NANNI, M. R.; GUERRERO, C.; DA SILVA JUNIOR, C. A.; CRUCIOL, L. G. T.; CHICATI, M. L.; SILVA, G. F. C. Organic matter and sand estimates by spectroradiometry: Strategies for the development of models with applicability at a local scale. **Geoderma**, V. 340, p. 224–233. 2019. doi:10.1016/j.geoderma.2019.01.021
- CHABRILLAT, S.; GHOLIZADEH, A.; NEUMANN, C.; BERGER, D.; MILEWSKI, R.; OGEN, Y.; BEN-DOR, E. Preparing a soil spectral library using the Internal Soil Standard (ISS) method: Influence of extreme different humidity laboratory conditions. **Geoderma**, v. 355, p. 113855. 2019. doi:10.1016/j.geoderma.2019.07.013
- CHANZY A.; TARUSSOV A.; JUDGE A.; BONN F. Soil water content determination using a digital ground-penetrating radar, **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 60 p.1318–1326. 1996.
- CHEREM, L. F. S.; VARAJÃO, C. A. C. O papel da lito-estrutura do carste na morfodinâmica cenozóica da Serra Geral de Goiás (GO/TO/BA): aproximações iniciais. **Revista Geonorte** , v. 10 , p. 180-184 , 2014.
- DE BENEDETTO, D.; CASTRIGNANÒ, A.; SOLLITTO, D.; MODUGNO, F. 2010. Spatial relationship between clay content and geophysical data. **Clay Minerals.** v. 45 (2), p. 197-207.
- EMBRAPA (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA; SOLOS, E.; MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, P. E A. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5. ed. Brasília: [s.n.]
- GRIFFITH, G.; GOKA T. in: Safety Design for Space Systems, - The Space Environment: Natural and Induced Capítulo 2. **Theoretical Foundation and Basic Properties of Thermal Radiation.** P. 7-104. 2009.
- LAMINE, S.; PETROPOULOS, G.; BREWER, P.; BACHARI, N. E. I.; SRIVASTAVA, P.; MANEVSKI, K.; KALAITZIDIS, C.; MACKLIN, M. Heavy Metal Soil Contamination Detection Using Combined Geochemistry and Field Spectroradiometry in the United Kingdom. **Sensors.** v. 19(4), p. 762. 2019.doi:10.3390/s19040762

NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. 2006. Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 70:393-407.

NOCITA, M.; STEVENS, A.; VAN WESEMAEL, B.; AITKENHEAD, M.; BACHMANN, M.; BARTHES, B.; BEN-DOR, E.; BROWN, D. J.; CLAIROTTE, M.; CSORBA, A. 2015. Soil spectroscopy: an alternative to wet chemistry for soil monitoring. **Adv. Agron.** v.132, p. 139–159. [https:// doi.org/10.1016/bs.agron.2015.02.002](https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.02.002).

QI F, ZHU AX. Knowledge discovery from soil maps using inductive learning. **Int J Geogr Inf Sci.** 2003. v. 17, p.771-795.

RODOLFO, F. J.; ARAUJO, L. G.; SOUZA, R. Q.; BATISTA, F. P. D.; OLIVEIRA, D. N. S.; LACERDA, M. P. C. Soil-landscape relationships on toposequences in Brasilia, Federal District, Midwest OF Brazil. **Nativa.** v. 3 (1), p. 27-35. 2015. DOI: 10.14583/2318-7670.v03n01a05

RODRIGUES, M.; NANNI, M. R.; CEZAR, E.; SANTOS, G. L. A.; REIS, A. S.; OLIVEIRA, K. M. Evaluation of the use of spectroradiometry for the determination of soil exchangeable ions after the application of mining coproducts. **Applied Spectroscopy Reviews**, 2019. doi:10.1080/05704928.2019.1683569

SCHNEIDER, W.; YOUNG, R. Spectroradiometry methods Application note (A14). **Optronic Laboratories, Inc.**, n. 407, p. 47, 1998.

SUN, F. J.; BAKR, N.; DANG, T.; PHAM, V.; WEINDORF, D. C.; JIANG, Z. D.; LI, H. L.; WANG, Q. B. **Geoderma.** v. 358 N°: 113997. 2020. DOI: 10.1016 / j.geoderma.2019.113997

THOMAZ, E. L. Interaction between ash and soil microaggregates reduces runoff and soil loss. **Science of the Total Environment**, v. 625, p. 1257–1263, 2018.

VASCONCELOS, V.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, É. S.; COUTO JÚNIOR, A. F.; GUIMARÃES, R. F. G.; R. A. T. Sistema de classificação geomorfométrica baseado em uma arquitetura sequencial em duas etapas : árvore de decisão e classificador espectral, no Parque Nacional Serra da Canastra. **Revista Brasileira de Geomorfologia.** v. 13, n° 2. 2012. [dx.doi.org/10.20502/rbg.v13i2.248](https://doi.org/10.20502/rbg.v13i2.248)

ZAJÍCOVÁ, K.; CHUMAN, T. Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review. **Geoderma**, v. 343, p. 116–129. 2019.