

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**FORMAÇÃO GEOLÓGICA E PASTAGENS DEGRADADAS NO
MUNICÍPIO DE VERÍSSIMO-MG**

Aline Rombega Tito Rosa
Bióloga

2020

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**FORMAÇÃO GEOLÓGICA E PASTAGENS DEGRADADAS NO
MUNICÍPIO DE VERÍSSIMO-MG**

Aline Rombega Tito Rosa

Orientador: Prof. Dr. Marcílio Vieira Martins Filho

Co-Orientador: Prof. Dr. Renato Farias do Valle Jr

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

R788f

Rosa, Aline Rombega Tito

Formação geológica e pastagens degradadas no município de
Veríssimo-MG / Aline Rombega Tito Rosa. -- Jaboticabal, 2020
64 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Marcílio Vieira Martins Filho
Coorientador: Renato Farias do Valle Júnior

1. Solo degradado. 2. Pastagem. 3. NDVI. 4. Formação geológica. I.
Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: FORMAÇÃO GEOLÓGICA E PASTAGENS DEGRADADAS NO MUNICÍPIO DE VERÍSSIMO-MG

AUTORA: ALINE ROMBEGA TITO ROSA

ORIENTADOR: MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola (Solos e Adubos) / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof. Dr. JOÃO ANTONIO GALBIATTI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal p/

Prof. Dr. ANTÔNIO CARLOS BARRETO (Participação Virtual)
Departamento de Irrigação e Drenagem - IFTM / Uberaba/MG p/

Profa. Dra. VERA LUCIA ABDALA (Participação Virtual)
Laboratório de Geoprocessamento / IFTM - Uberaba/MG p/

Prof. Dr. GENER TADEU PEREIRA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal p/

Jaboticabal, 08 de outubro de 2020

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

ALINE ROMBEGA TITO ROSA – Bióloga, filha de José Donizeti Tito e Neide Rombega Tito, nasceu em Bebedouro, interior do Estado de São Paulo, no dia 05 de janeiro de 1981. Coursou o Ensino Fundamental na Escola Estadual Alzira de Freitas Casseb e Ensino Médio na Escola Estadual Profª. Nena Giannasi Buck, ambas na cidade de Monte Azul Paulista-SP. Em Fevereiro de 2010, ingressou no Curso de Graduação em Ciência Biológicas, pelo Centro Universitário de Bebedouro (UNIFAFIBE), Bebedouro-SP, e em Dezembro de 2013, obteve o título de Bacharel e Licenciatura em Ciência Biológicas. Realizou estágio em pesquisa no Centro de Estudo e Pesquisa do Desenvolvimento Regional/ CEPeD-UNIFAFIBE, com desenvolvimento de projeto de pesquisa científica em parceria com Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV) – UNESP – Campus de Jaboticabal, SP. Atuou como Professora Auxiliar, disciplina de Matemática, pela Secretaria de Estado da Educação (SP), regional de Jaboticabal-SP, no período de abril de 2013 a janeiro de 2014. Especialização em Saneamento Ambiental, pelo Instituto Federal do Triângulo Mineiro, campus Uberaba-MG, com obtenção do título em julho de 2016. Doutoranda e Mestre em Agronomia (Ciência do Solo) da Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV) – Campus de Jaboticabal, SP. Atualmente atua como docente na área de Prática, Conservação e Manejo dos Solos, Meio Ambiente e água nos cursos Técnicos em Agricultura e Zootecnia da Escola Técnica de Formação Profissional de Minas Gerais (EFOP) e Geologia no curso de Engenharia Civil do Centro de Ensino Superior de Uberaba (CESUBE).

“Não há substituto para o trabalho duro.”

Thomas Edison

Dedico a minha família, pelo apoio e amor.

AGRADECIMENTOS

À Deus por permitir concretizar mais uma etapa da minha vida.

À minha mãe e meu pai, pela vida, por terem me ensinado que o percurso do caminho que constrói a nossa história deve estar baseado no respeito, ética, gratidão por tudo e por todos.

A minha gratidão ao meu companheiro Rodrigo, pela paciência, disposição, ensinamentos, ajuda, e por estar junto a mim nos momentos de maiores dificuldades, sempre acreditando na superação dos meus limites.

À minha filha querida, Cecília, fundamental em todos os momentos de minha vida, por todo carinho, delicadeza, amizade, amor, compreensão e palavras de motivação.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias pela excelente formação e pela estrutura oferecida para a realização do curso de Doutorado.

Ao Prof. Dr. Marcílio Vieira Martins Filho, pela grande oportunidade de realização deste trabalho, pela brilhante orientação oferecida e, principalmente pelo exemplo de dedicação, sabedoria e profissionalismo.

Ao Prof. Dr. Renato Farias do Valle Júnior pelo auxílio, pelos exemplos de perseverança e luta, mas especialmente, pela amizade, ao longo desses anos.

Ao Prof. Dr. João Antonio Galbiatti, por ter apontado novos caminhos, pela amizade e palavras de motivação.

A todos os professores que contribuíram para a formação durante o curso de doutorado.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

MUITO OBRIGADA!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 Cartografia	5
2.2 Sensoriamento Remoto	5
2.3 Comportamento Espectral	9
2.3.1 Propriedades Espectrais	9
2.3.1.1 Comportamento Espectral dos Solos.....	11
2.3.1.2 Comportamento Espectral das Culturas Agrícolas.....	15
2.4 Qualidade do Solo	15
2.4.1 Atributos Físicos e Químicos do Solo	16
3 OBJETIVOS.....	19
3.1 <i>Objetivo Geral</i>	19
3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	19
4 MATERIAL E MÉTODOS	20
4.1 Área de Estudo	20
4.2 Mapeamento Pastagens Degradadas.....	22
4.3 Fertilidade e Atributos Físicos do Solo.....	24
4.4 Análise dos Dados	26
4.5 Análises Estatísticas	27
5 RESULTADOS	28
5.1 Padrões NDVI	28
5.2 Caracterização do Solo.....	31
5.3 Mapa de Pastagem Degradada	33
6 DISCUSSÃO.....	36
7 CONCLUSÕES.....	40
8 REFERÊNCIAS	41

FORMAÇÃO GEOLÓGICA E PASTAGENS DEGRADADAS NO MUNICÍPIO DE VERÍSSIMO-MG

RESUMO –

A degradação de pastagens é um problema ambiental global que requer mitigação, em vista a restauração. Nesta perspectiva, é imprescindível a identificação e mapeamento preciso destas áreas. Assim, o sensoriamento remoto torna-se protagonista no processo de diagnóstico, por ser um método eficiente e econômico. Portanto, foi utilizada no estudo abordagem aprimorada no diagnóstico de áreas de pastagens degradadas e qualidade dos solos baseada em NDVI na Bacia do Rio Uberaba, Veríssimo (Estado de Minas Gerais, Brasil). O método mostrou-se eficiente no diagnóstico e mapeamento de aproximadamente 387 km² de áreas de pastagens, sendo 162,1 km² de pastos sadios e 224,9 km² de pastos degradados. A caracterização do nível de degradação das pastagens revelou expressivo declínio da matéria e carbono orgânica e do pH, com aumento da concentração de alumínio trocável e da acidez potencial. Em decorrência, foi evidenciada redução de macronutrientes e da macroporosidade, comprometendo a adequada aeração, permeabilidade e armazenamento de água dos solos das áreas com presença de degradação, nas formações Marília (210,5 km²), Serra Geral (6,05 km²) e Uberaba (8,4 km²). Os resultados em sua maioria são fortes o suficiente para servir como alerta a toda população e às autoridades ambientais sobre a importância do controle e mitigação, em vista a prevenção e recuperação da qualidade dos solos das áreas de pastagem, em especial no bioma Cerrado.

“Palavras-Chave”: NDVI, Sensoriamento Remoto, Pastagem, Solo Degradado.

GEOLOGICAL FORMATION AND DEGRADED PASTURES IN VERÍSSIMO-MG

ABSTRACT –

Pasture degradation is a global environmental problem that requires mitigation in view of restoration. In this perspective, it is essential to identify and accurately map these areas. Thus, remote sensing becomes a protagonist in the diagnostic process, as it is an efficient and economical method. Therefore, an improved approach was used in the study to diagnose degraded pasture areas and soil quality based on NDVI in the Uberaba River Basin, Veríssimo (State Minas Gerais, Brazil). The method proved to be efficient in the diagnosis and mapping of approximately 387 km² of pasture areas, in the Uberaba River Basin, with 162.1 km² of healthy pastures and 224.9 km² of pastures degraded. The characterization of the level of degradation of pastures revealed a significant decline in matter and organic carbon and pH, with an increase in the concentration of exchangeable aluminum and potential acidity. As a result, a reduction in macronutrients and macroporosity was observed, compromising adequate aeration, permeability and storage of soil water in areas with the presence of degradation, in the Marília (210.5 km²), Serra Geral (6.05 km²) and Uberaba (8.4 km²). The results are strong enough to serve as a warning to the entire population and to environmental authorities about the importance of control and mitigation, in view of the prevention and recovery of soil quality in pasture areas, especially in the Cerrado biome.

Keywords: NDVI, Remote Sensing, Pasture, Degraded Soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação de uma Onda Eletromagnética.	6
Figura 2: Captação de Imagem por Sensoriamento Remoto	7
Figura 3: Comportamento espectral típico de uma folha verde sadia.	10
Figura 4: Comportamento da reflectância de acordo com característica tiomórfica dos solos.	12
Figura 5: Localização Município de Veríssimo - MG	20
Figura 6: Formação Geológica Município de Veríssimo-MG.	21
Figura 7: Mapa de Uso e Ocupação do Solo da Bacia do Rio Uberaba.....	22
Figura 8: Fisionomias de Pastagens.	22
Figura 9: Mapa de NDVI do município de Veríssimo-MG.....	28
Figura 10: Padrões temporais do NDVIbuffer no período de 2013 a 2016.....	30
Figura 11: Mapa de pastagem degradada extrapolado a partir da comparação de imagens de NDVI	34
Figura 12: Áreas de coincidência do pixel para pastagens degradadas	35
Figura 12: Mapa das pastagens degradadas para as formações Marília, Uberaba e Serra Geral no Município de Veríssimo-MG.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Bandas Espectrais do Sensor MODIS.....	8
Tabela 2: Coordenadas Geográficas e Formação Geológicas dos Polígonos	23
Tabela 3: NDVI das fisionomias de pastagens nas formações geológicas	29
Tabela 4: Caracterização dos Solos das fisionomias de pastagens das formações Uberaba, Marília e Serra Geral.	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLA

Aw	- Clima Tropical com Chuvas de Verão
IC	- Intervalo de Confiança
M	- Magnético
AVHRR	- <i>Advanced Very High Resolution Radiometer Thematic Mapper</i>
w	- Chuvas de Verão
A	- Clima Tropical
CERES	- Clouds and the Earth's Radiant System
R ²	- Coeficiente de Determinação
R ² _(aj) / R-sq _(aj)	- Coeficiente de Determinação Ajustado
S / DP	- Desvio Padrão
EOS-	- <i>Earth Observing System</i>
E	- Elétrico
ETM+	- <i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i>
EVI	- <i>Enhanced Vegetation Index</i>
h	- Horas
NDVI	- Índice de Vegetação da Diferença Normalizada
IVM	- Infravermelho Médio
IVP	- Infravermelho Próximo
IVT	- Infravermelho Termal
MO	- Matéria Orgânica
MODIS-	- <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MISR	- <i>Multiangle Imaging Spectroradiometer</i>
NASA	- <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
W	- Oeste
Fe ₂ O ₃	- Óxidos de Ferro
PI	- Pastagem com Presença de Plantas Invasoras
PIC	- Pastagem com Presença de Plantas Invasoras e Cupim

PIE	- Pastagem com Presença de Plantas Invasoras e Erosão
PS	- Pasto Sadio
Os	- Percentual de Saturação em Volume
V%	- Percentual de Variação
Pt	- Porosidade Total
REM	- Radiação Eletromagnética
R	- Reflectância na Faixa do Vermelho
SLC	- <i>Scan Line Correction</i>
OLI	- <i>Sensor Operacional Land Imager</i>
SIG	- Sistema de Informação Geográfica
S	- Sul
TIRS	- <i>Thermal Infrared Sensor</i>
UTM	- Universal Transversa de Mercator
NIR	- Valor do Reflectância no Vermelho Próximo
V	- Visível
WSG	- World Geodetic System

LISTA DE SÍMBOLOS

θ	- Ângulo Teta
cm^3	- centímetros cúbicos
cmol/dm^3	Centímolc por decímetro cúbico
dag/kg	Decagrama por Quilo
sr	- Esterradiano (Ângulo Sólido)
g	- Gramas
$^{\circ}\text{C}$	- Grau Celsius (medida de temperatura)
$^{\circ}$	- Graus
Khz	- Kilohertz
L	- Litros
Mg^{2+}	- Magnésio
MPa	- Mega Pascal
m	- Metros
μm	- Micrometros
mg/dm^3	Miligramma por decímetro cúbico
'	- Minutos
Mol	- Mol
Mol L^{-1}	- Mol por litro
nm	- Nanômetros
%	- Percentual/ percentagem
Km	- Quilômetros
"	- Segundos
W	- Watts

1 INTRODUÇÃO

O crescimento demográfico nas últimas décadas tem repercutido no Brasil em exacerbada degradação ambiental, decorrente principalmente da retirada da cobertura vegetal, para implantação de áreas de pastagens e cultivares. Dados divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, em 2016, apontam que o rebanho brasileiro era de aproximadamente 220 milhões de ruminantes (IBGE, 2017). Assim, a criação extensiva representa uma alternativa prática e econômica, em vista a produção de carne bovina e leite.

Apesar das áreas de pastagens representarem importante fonte nutricional, o exacerbado aumento do rebanho, principalmente na região sudeste no bioma cerrado, aliada à falta de manejo para reposição de nutrientes no solo, tem influenciado negativamente na qualidade da pastagem e do solo, bem como na produtividade dos sistemas agrícolas (VALLE JÚNIOR et al., 2019).

Estimativas apontam que mais da metade da área de pastagem no bioma cerrado pode estar em algum estágio de degradação, totalizando aproximadamente 32 milhões de hectares (EMBRAPA, 2014). A degradação das áreas de pastagens propicia acentuada perda econômica, social e ambiental, na que tange à produção de leite e carne. Anualmente, no custo global representa perda de aproximadamente 7 bilhões de dólares, sendo que nos países da América Latina chega a 1 bilhão de dólares (KWON et al., 2016).

Os estágios de degradação das pastagens podem ser identificados por meio de características fisiológicas na planta e no solo. Na planta, a degradação manifesta-se pela redução da altura e da capacidade de regeneração da forrageira, surgindo presença de áreas sem cobertura vegetal, plantas invasoras e/ou pragas (VIEIRA & KICHEL, 1995). No solo, os sinais mais proeminentes são a compactação, erosão e deficiências minerais, especialmente de nutrientes como nitrogênio e fósforo (FAO, 2009).

Os sinais de degradação das pastagens nem sempre são visíveis, dificultando a detecção precoce desse fenômeno. Os sinais mais visíveis são a redução da densidade de plantas forrageiras, a frequência de invasoras e/ou pragas, e o percentual de cobertura vegetal (VALLE JÚNIOR et al., 2019).

A ocorrência de plantas invasoras em pastagens está entre os primeiros sinais de degradação. Nesta fase, as plantas invasoras competem com as forrageiras pelos nutrientes, espaço, luz e água (DIAS FILHO, 1998).

Estágios moderados de degradação são caracterizados pela proliferação de ninhos de cupins, decorrentes do manejo inadequado em áreas de pastagens antigas, propiciando efetiva redução da qualidade das pastagens e concomitante depreciação da propriedade rural (VALÉRIO, 2006).

A degradação das pastagens em seu estágio mais avançado é caracterizada por uma mudança na dinâmica da taxa de ocupação vegetal, onde as plantas invasoras passam a competir com as forrageiras. Assim, ocorre drástica redução da cobertura vegetal e da produtividade de pastagem; com consequente redução da produção animal (TOWNSEND et al., 2012).

A pastagem degradada mal tem a possibilidade de se recuperar naturalmente e, portanto, é incapaz de sustentar a qualidade e os níveis de produção de forragem exigidos pelos animais. Também é incapaz de superar os efeitos nocivos de pragas, doenças e plantas invasoras. Se a degradação das pastagens persistir, pode atingir o estágio de degradação total do recurso do solo, com danos irreparáveis para a sociedade (MACEDO et al., 1993).

Além da perda de produtividade e invasão por espécies forrageiras não palatáveis, outros sintomas comuns de degradação de pastagens compreendem a redução da cobertura vegetal, com associação ao aumento do risco de erosão, aumento da acidez e compactação de solos, além da redução de biomassa microbiana (FEARNSIDE, 1996; MARTÍNEZ & ZINCK, 2004). A disseminação de tais sintomas e a degradação das pastagens, como um todo, promovem o desmatamento contínuo de áreas adjacentes, ampliando ainda mais os danos ecológicos (STEINFELD et al., 2006).

Todavia, a extensão esmagadora de pastagens degradadas em todo território nacional demanda implementação de medidas que possibilitem melhor gestão e restauração, com a finalidade de prevenir ou mitigar esses impactos. O primeiro passo consiste no mapeamento preciso dessas áreas, em que o sensoriamento remoto é o caminho mais provável (VALLE JÚNIOR et al., 2019).

As imagens orbitais são comumente usadas em pesquisas ambientais, devido ao seu baixo custo e mesmo disponibilidade gratuita em resoluções satisfatórias de tempo e espaço. Com o advento e desenvolvimento de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), essas imagens são facilmente processadas em ferramentas de álgebra de mapas de software GIS. Este avanço tecnológico permitiu uma extensa investigação da degradação da vegetação, incluindo pastagens, por meio do índice de vegetação NDVI - normalized difference (TUCKER, 1979). O NDVI é um índice que apresenta uma relação linear entre as bandas espectrais do infravermelho próximo e vermelho das imagens de satélite.

O uso de NDVI para identificar pastagens degradadas tem sido objeto de vários estudos recentes (VALLE JÚNIOR et al., 2019; Hopping et al., 2018; Jakimow et al., 2018). Em um desses estudos, realizado no Quirguistão, Zhumanova et al. (2018) encontraram diferenças significativas na estrutura composicional entre pastagens degradadas e não degradadas em semi-deserto, estepe alpina, prado sub-alpino e ecozonas alpinas, causadas por uma substituição de gramíneas dominantes por arbustos ou arbustos não palatáveis com diferentes padrões de refletância. Em um estudo focado na utilidade do NDVI para predizer a qualidade de forrageira em áreas de rebanho de búfalos africanos, Ryan et al. (2012) avaliaram a influência do substrato geológico nos padrões de NDVI. O estudo de Tepanosyan et al. (2017) estabeleceram com sucesso regressões lineares entre a abundância de pastagens derivadas de sensoriamento remoto (NDVI) e dados de veracidade do solo. No entanto, em nenhum desses estudos, os autores tentaram usar o NDVI versus relações de qualidade de pastagem para mapear pastos degradados dentro de pastagens semelhantes, através de extrapolação (Brito et al., 2017). Um relatório recente sobre o mapeamento de pastagens degradadas na região do Triângulo Mineiro (Oeste de Minas Gerais, Brasil), no município de Uberaba, foi baseado em valores característicos de NDVI extrapolados de áreas experimentais onde três estágios de degradação de pastagem foram verificados in loco, utilizando uma abordagem de sensoriamento aprimorada, considerando os efeitos da formação geológica e da sazonalidade (VALLE JÚNIOR et al., 2019).

De acordo com Santos e Ferreira (2014), a partir da década de 1970, a Mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba vem apresentando mudanças na

dinâmica do uso de ocupação da terra, decorrente do aumento das áreas de pastagens, culturas de soja e cana-de-açúcar em detrimento das áreas nativas do bioma cerrado.

Em particular na bacia do rio Uberaba, Veríssimo-MG, ocorreu nos últimos 35 anos, um aumento de 81,44 Km² em áreas de pastagem, principalmente extensivas (ALMEIDA & VALLE JÚNIOR, 2013). Esta dinâmica de uso e ocupação do solo difere da tendência observada na região sudeste do país.

Atualmente, a pecuária parece dar sinais de modernização e vem ganhando produtividade (RONQUIM et al., 2015). Assim, levando em consideração a importância da região do Triângulo Mineiro no agronegócio brasileiro e a alteração da dinâmica do uso e ocupação dos solos nesta região, o objetivo do estudo foi diagnosticar áreas de pastagens na bacia do rio Uberaba, Veríssimo-MG e correlacionar com a fertilidade e atributos físicos do solo, por meio de abordagem aprimorada de sensoriamento remoto baseada em NDVI, considerando os efeitos da formação geológica e da sazonalidade.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cartografia

A Cartografia, por meio das formas de representação do espaço, utiliza os produtos cartográficos para o conhecimento e estudo da geografia de um determinado local. Esses produtos registram e armazenam informações que podem apoiar o planejamento e gestão do espaço geográfico na sociedade (RODRÍGUES, 2005).

As representações cartográficas podem ser apresentadas com a utilização de imagens e símbolos gráficos, retratando a distribuição dos fenômenos naturais e culturais com suas relações, bem como as mudanças no tempo e no espaço geográfico (SALICHTCHEV 1988).

Com os avanços tecnológicos relacionados com a representação do espaço geográfico e dos fenômenos, ocorreu o surgimento da cartografia digital, o Sistema de Informação Geográfica (SIG). O que possibilitou uma constante análise e sistematização do conhecimento geográfico, com aprimoramento principalmente das pesquisas relacionadas com as questões ambientais (RODRÍGUES, 2005).

Atualmente, o uso de séries temporais de imagens de Satélites tem possibilitado o detalhamento e sistematização da análise de mudanças ambientais ocorridas em uma região, além de possibilitar o estudo do espaço ao longo do tempo e também do SIG, que permite a aquisição, armazenamento e manipulação de informações de forma rápida e eficiente, proporcionando a tomada de decisões, suprimindo os impactos ambientais.

2.2 Sensoriamento Remoto

O Sensoriamento Remoto é definido como um conjunto de “hardwares” e “softwares” utilizados na coleta e tratamento de informações espectrais orbitais, de alvos na superfície terrestre.

A definição de Sensoriamento Remoto é apresentada por vários autores, como Lillesand e Kiefer (1987), que define como sendo a ciência de obter informações de um determinado objeto, área ou fenômeno através da análise dos

dados adquiridos sem o contato direto com os objetos investigados. Entretanto, Novo (1989), define como sendo a utilização de modernos sensores, aeronaves, espaçonaves, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das interações entre a Radiação Eletromagnética (REM) e as substâncias existentes na superfície terrestre em suas mais diversas manifestações.

Independente da definição, no sensoriamento remoto a maioria dos sensores são utilizados para quantificar alvos na superfície da Terra, utilizando como fonte de radiação o sol; exceto os sensores ativos (radares e laser), que possuem suas próprias fontes de radiação. Os sensores ativos podem detectar informações sobre a superfície terrestre sob qualquer condição atmosférica. Assim, o sensoriamento remoto é uma forma de transmissão da energia que consiste na aceleração de uma carga elétrica que provoca perturbações no campo Elétrico (E) e Magnético (M), se propagando (C) no vácuo (Figura 1). Quando essa radiação interage com a matéria, o resultado desta interação depende das propriedades elétricas e magnéticas do material (NOVO, 1989).

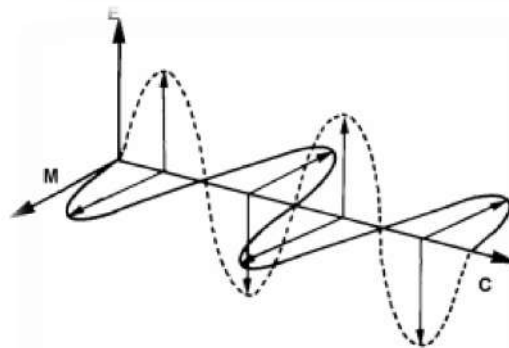


Figura 1: Representação de uma Onda Eletromagnética. FONTE: MOREIRA (2001)

A REM após atravessar a atmosfera atinge alvos na superfície terrestre e interage com os mesmos. O resultado dessa interação consiste no fracionamento da energia incidente em três componentes. Assim, parte desta energia é absorvida (1º componente) e o restante sofre transmissão (2º componente) e reflexão (3º Componente), retornando ao espaço (Figura 2). Além disso, os alvos também emitem REM, resultante de reações físico-químicas que ocorrem ao nível atômico e molecular de cada alvo. Deste modo, é possível analisar as condições dos alvos na superfície terrestre com o emprego de sensores, que captam a radiação refletida ou emitida por eles (RODRÍGUEZ, 2000).

Destacam-se no uso do sensoriamento remoto algumas propriedades como a visão sinóptica, que permite a observação global dos alvos incluindo áreas de difícil acesso. Além disso, podem-se destacar os tipos de resolução, como a *Espectral*, que possibilita o estudo e caracterização do comportamento espectral dos diferentes objetos encontrados na superfície; a *Espacial*, onde é determinada a menor distância entre dois objetos que o sensor é capaz de identificar como diferentes entre si; a *Radiométrica*, que define a sensibilidade do sensor, isto é, detecta a variação da energia em gradações em escala de cinza; e finalmente a *Temporal*, referente à frequência na passagem do satélite sobre uma mesma área (SIMONETT, 1983).

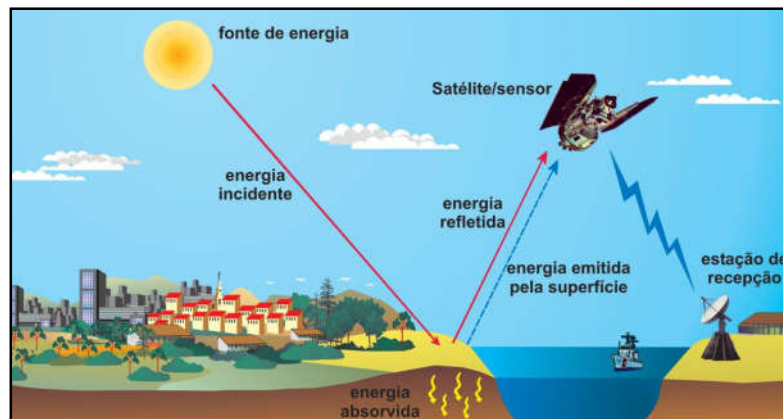


Figura 2: Captação de Imagem por Sensoriamento Remoto (Interação Sol - Terra – Satélite).
FONTE: FLORENZANO (2002)

O nível de aquisição dos dados está inteiramente ligado à altitude do sensor, dependendo da mesma haverá diferenças na dimensão da área detectada, na interferência dos fatores ambientais, na REM registrada pelo sensor, assim como no nível de informação (MAZZOCATO, 1998).

No presente estudo foram utilizadas as imagens orbitais captadas pelo sensor MODIS, a bordo dos satélites Terra (EOS AM-1).

O Programa EOS (*Earth Observing System*) consiste na concepção de plataformas orbitais com vários sensores a bordo, visando coletar simultaneamente diferentes dados, que são ofertados gratuitamente pela NASA.

A plataforma terra foi a primeira a ser lançada pelo programa EOS, tendo a bordo os sensores: CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*), MODIS e MISR (*Multi-angle Imaging SpectroRadiometer*). O sensor MODIS é o principal instrumento desta plataforma, sendo lançado em dezembro de 1999.

Tabela 1: Bandas Espectrais do Sensor MODIS.

	Banda	Largura da Banda	Radiância
Terra/Nuvens/Aerossóis	1	620 - 670	21,8
	2	841 - 876	24,7
Terra/Nuvens/Aerossóis	3	459 - 479	35,3
	4	545 - 565	29
	5	1230 - 1250	5,4
	6	1628 - 1652	7,3
	7	2105 - 2155	1
Cor do oceano/Fitoplancton/Biogeoquímica	8	405 - 420	44,9
	9	438 - 448	41,9
	10	483 - 493	32,1
	11	483 - 493	27,9
	12	546 - 556	21
	13	662 - 672	9,5
	14	673 - 683	8,7
	15	743 - 753	10,2
Vapor d'água atmosférico	16	862 - 877	6,2
	17	890 - 920	10
	18	931 - 941	3,6
Temperatura superfície/nuvens	19	915 - 965	15
	20	3,660 - 3,840	0,45 (300K)
	21	3,929 - 3,989	2,38 (335K)
	22	3,929 - 3,989	0,67 (300K)
Temperatura atmosférica	23	4,020 - 4,080	0,79 (300K)
	24	4,433 - 4,498	0,17 (250K)
Vapor d'água de nuvens Cirrus	25	4,482 - 4,549	0,59 (275K)
	26	1,360 - 1,390	6
	27	6,535 - 6,895	1,16 (240K)
Propriedade de nuvens	28	7,175 - 7,475	2,18 (250K)
Ozônio	29	8,400 - 8,700	9,58 (300K)
Temperatura de superfície/nuvens	30	9,580 - 9,880	3,69 (250K)
	31	10,780 - 11,280	9,55 (300K)
Altitude de topo de nuvens	32	11,770 - 12,270	8,94 (300K)
	33	13,185 - 13,485	4,52 (260K)
	34	13,485 - 13,785	3,76 (250K)
	35	13,785 - 14,085	3,11 (240K)
	36	14,085 - 13,385	2,08 (220K)

Fonte: Rudorff et al., 2007. Bandas 1 a 19 estão em nm e as Bandas 20 a 36 estão em μm . Radiância espectral em $(\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1})$

Segundo Vermote et al. (2002), o sensor MODIS foi construído baseado nas experiências do AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) e TM (*Thematic Mapper*), visando a coleta de dados globais diários, com alta qualidade radiométrica e geométrica.

Imagens orbitais são obtidas a cada dois dias, fornecendo informações da superfície terrestre, oceano e atmosfera nos comprimentos de onda do visível e

infravermelho do espectro eletromagnético. Possui 36 bandas espectrais no intervalo de 0,4 a 14,4 μm com resolução radiométrica de 12 bits (Tabela 2).

As imagens orbitais possuem resolução espacial de 250 m (bandas 1 e 2), 500 m (bandas 3 a 7) e 1 km (bandas 8 a 36), sendo que o sensor está em órbita a 705 km de altura, permitindo varredura no sentido ortogonal numa faixa de 2.330 km.

Dentre os produtos MODIS relacionados ao estudo da vegetação, o MOD13Q1 – Grades de índices de vegetação (Máximo NDVI e MVI integrado) – contém os índices de vegetação NDVI e EVI (*Enhanced Vegetation Index*), produzidos globalmente com resolução de 250 m, em composições de imagens de 16 dias (JUSTICE et al., 2002). Além disso, são oferecidas imagens corrigidas dos efeitos atmosféricos (nuvens, aerossóis, entre outros) e georreferenciadas.

2.3 Comportamento Espectral

O comportamento espectral dos alvos está integralmente associado às interações da REM, a qual interage com o alvo ou objeto na superfície terrestre refletindo, absorvendo e transmitindo essa mesma radiação em diferentes proporções, de acordo com suas propriedades bio-físico-químicas.

Vários sensores são capazes de captar e registrar essa radiação advinda dos alvos ou objetos presentes na superfície terrestre. Estes sensores são transportados via aérea por balões, helicópteros e aviões, ou ainda via orbital por satélites artificiais (FLORENZANO, 2002). Ainda, existem os espectroradiômetros que são sensores de medição no campo ou laboratório com o intuito de determinar a curva ou assinatura espectral de um determinado alvo como, por exemplo: a vegetação, os solos, a água ou sombra.

2.3.1 Propriedades Espectrais

O estudo do comportamento espectral da vegetação é fundamentado em dois aspectos, sendo o primeiro das folhas como entidades independentes e o segundo como um dossel.

As propriedades espectrais da vegetação podem ser representadas por processos de absorbância, reflectância e transmitância, podendo cada uma ser hemisférica ou bidirecional (PONZONI E SHIMABUKURO, 1991).

A energia radiante incidente, ao interagir com a folha, é parcialmente absorvida, transmitida e refletida. A energia absorvida seletivamente em determinados comprimentos de onda pelos pigmentos das plantas é, em parte, dissipada na forma de calor ou fluorescência, sendo que apenas uma pequena parcela da energia é armazenada em forma de compostos orgânicos através da fotossíntese (GATES et al., 1965).

As propriedades espectrais de uma folha estão relacionadas com a sua composição, morfologia e estrutura interna, podendo variar com a sua idade, dentro do mesmo grupo genético (KUMAR, 1972).

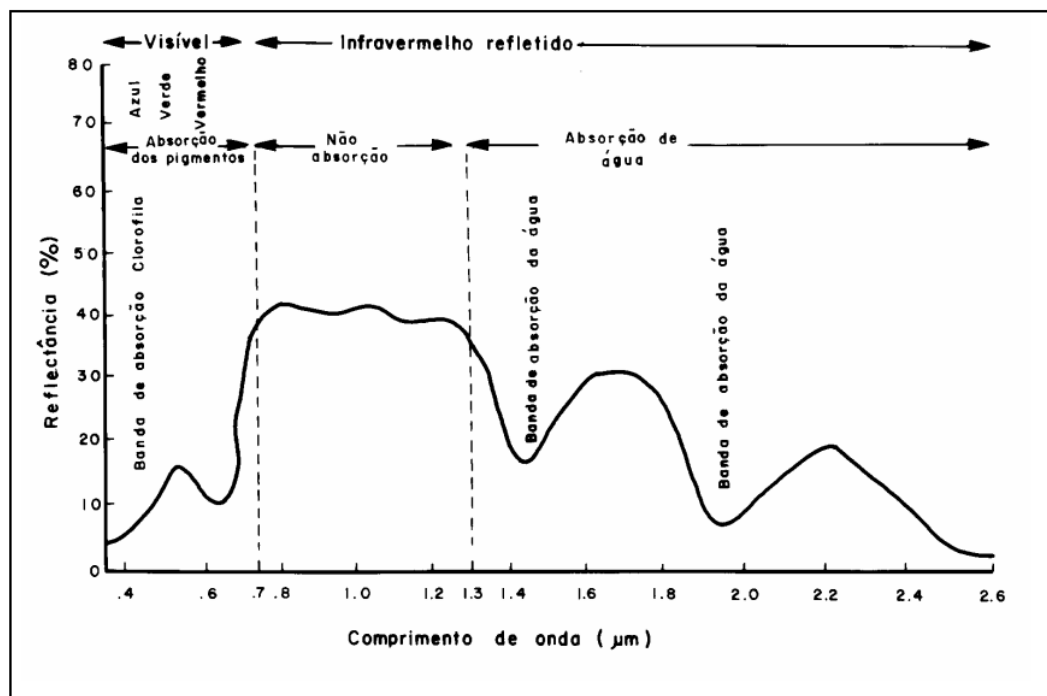


Figura 3: Comportamento espectral típico de uma folha verde sadia.
FONTE: KUMAR (1972).

Na Figura 3, apresenta a curva média típica de uma folha verde sadia. Pode-se verificar que a região do visível ($\lambda = 0,45-0,70 \mu\text{m}$) caracteriza-se por uma alta absorção da REM por parte dos pigmentos existentes nos cloroplastos. Estes são responsáveis pela baixa reflectância da vegetação na faixa do visível. Esses pigmentos são a clorofila, os carotenos e as xantofilas presentes nas folhas em percentagens variadas (KUMAR, 1972).

Os diferentes tipos de elementos da vegetação foram o dossel: folhas, galhos, frutas, flores etc. (GOEL, 1988). A interação da REM com a cobertura vegetal é

complexa devido aos próprios parâmetros que compõem a arquitetura do dossel, e o fato dele ser geralmente composto por diferentes espécies vegetais.

O fluxo de radiação solar incidente sobre um dossel é constituído por duas partes: uma fração da radiação que não é nem absorvida nem espalhada pela atmosfera, denominada fluxo direto, e outra fração espalhada pela atmosfera na direção descendente e que incide sobre o dossel de forma difusa, denominada de radiação difusa ou dossel.

O fluxo solar incidente e a radiância do dossel, ou seja, o fluxo que atinge o sensor depende não só das propriedades de absorção ou espalhamento dos elementos que compõem a vegetação, como também da orientação e densidade dos elementos (GOEL, 1988).

Neste contexto, a reflectância do dossel é produto da interação entre a radiação solar, a atmosfera, os elementos da vegetação e o solo. A análise da reflectância proveniente do dossel é muito complexa devido ao grande número de variáveis envolvidas (KUMAR, 1972; PINTER et al., 1985; GOEL, 1988; CURRAN E WARDLEY, 1988).

De acordo com Colwell (1974), o fator de reflectância espectral bidirecional de folhas é o parâmetro fundamental para a caracterização do dossel. Outros parâmetros são: transmitância das folhas, quantidade e arranjo do dossel (galhos, frutos etc.), características do solo, ângulo zenital solar, ângulo de visada e ângulo azimutal relativo (da fonte e do sensor).

A caracterização dossel é realizada por meio de modelos matemáticos de reflectância, fornecendo conexão lógica entre as características botânicas e biofísicas do dossel, a geometria da interação radiométrica e as mudanças resultantes da radiação refletida (GOEL, 1988).

2.3.1.1 Comportamento Espectral dos Solos

Os principais parâmetros que podem alterar o comportamento espectral dos solos são:

A. Umidade:

Os solos úmidos geralmente se apresentam mais escuros que quando secos nas imagens orbitais, conferindo diferentes tonalidades de cinza: cinza escuro (solos úmidos) e claro (solos secos).

A coloração mais escura observadas nos solos úmidos está relacionada à maior absorção da REM, devido à presença de água, conferindo uma redução da reflectância do espectro eletromagnético na região do visível e do infravermelho próximo, diferindo dos solos secos.

De acordo com Formaggio (1999), este fenômeno está relacionado às reflexões internas dentro do fino filme de água que recobre as partículas do solo. Assim, parte da energia não é refletida, mas sim novamente refletida entre a superfície da partícula e a superfície do filme de água.

Neste sentido, quando se umedece o solo a curva espectral não muda de formato, mas ocorre acentuada redução da reflectância quando são umedecidos solos com pouca matéria orgânica (MO), em comparação aos solos com alto conteúdo de MO.

B. Matéria Orgânica:

Na medida em que o conteúdo de MO aumenta, a reflectância do solo diminui, no intervalo entre 0,4 e 2,5 μm (Visível ao Infravermelho Termal). Assim, no solo existem materiais orgânicos em diferentes estágios de decomposição, em que quanto maior a decomposição da material orgânico, maior será a absorção da REM e consequentemente menor será a reflectância do solo (Figura 4).

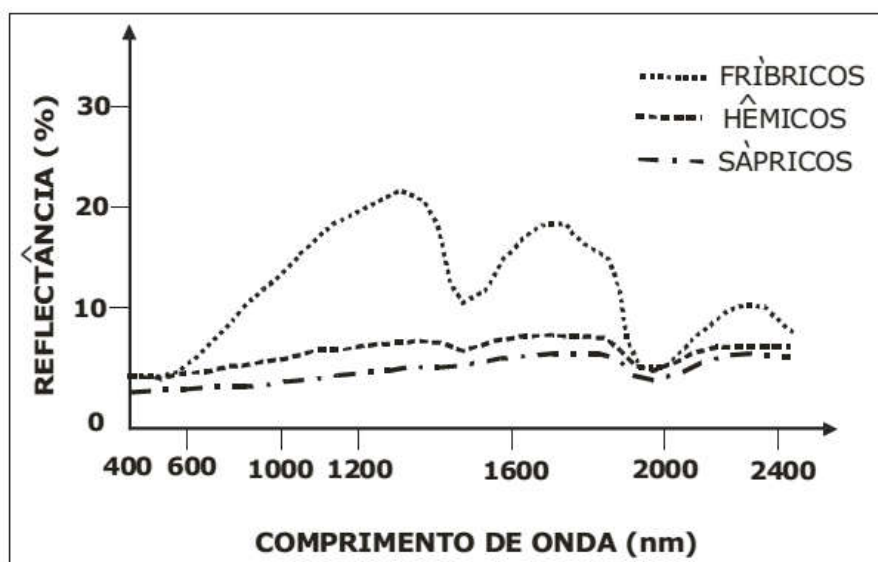


Figura 4: Comportamento da reflectância de acordo com característica tiomórfica dos solos.
FONTE: MOREIRA (2001).

Na figura 4 pode-se observar que de acordo com a característica tiomórfica dos solos, Sápricos, Hêmicos e Fíbricos, observam-se diferentes reflectâncias; altamente, moderadamente e fracamente decompostos, respectivamente (MOREIRA, 2001).

Os constituintes orgânicos (ácidos húmicos, úlvico e compostos não-específicos, incluindo resíduos de plantas em decomposição) influenciam na reflectância do solo em diferentes graus, embora a contribuição de cada um seja difícil de quantificar.

A reflectância entre 0,60 e 1,10 μm tem as melhores correlações com certos constituintes orgânicos; porém, há necessidade de melhores técnicas para determinar os constituintes orgânicos (Visível ao Infravermelho Próximo). O intervalo entre 0,90 e 1,22 μm é o melhor para mapear carbono orgânico dos solos. Os comprimentos de onda até 1,2 μm são os melhores para separar níveis de MO dos solos, isto é, a discriminação é maior na faixa do visível e do infravermelho próximo (FORMAGGIO, 1999).

C. Granulometria:

O tamanho e o formato das partículas do solo, bem como dos seus agregados, podem influenciar de várias maneiras na reflectância dos solos. Em estudo realizado por Formaggio (1999), foi evidenciado que as partículas finas presentes no solo preenchem completamente os volumes e formavam uma superfície mais plana. Todavia, agregados grossos (Irregulares) formavam uma superfície complexa, com presença de inúmeros espaços interagregados, ocorrendo à perda de parte do fluxo incidente pela penetração nestes espaços "armadilhas", ocorrendo à extinção completa de luz (FORMAGGIO, 1999).

D. Óxido de Ferro:

Em solos tropicais altamente intemperizados, observa-se influência dos níveis de óxido de ferro no comportamento da reflectância dos solos. O tipo e a quantidade relativa de óxidos de ferro caracterizam as cores dos solos, que variam de vermelhos a amarelos, os quais são ricos em argilas sesquioxídicas.

Os solos com elevado conteúdo de ferro podem ser facilmente identificados pela inflexão característica conferida pelo Fe_2O_3 (FORMAGGIO, 1999). Assim, o conteúdo de óxido de ferro livre apresenta relação significativa em termos espectrais, tanto no visível quanto no infravermelho. No entanto, a significância aumenta de acordo com os comprimentos de onda e a presença de MO não diminui a contribuição do ferro para a reflectância do solo.

E. Mineralogia de Argila:

Nos espectros dos minerais de argila dos grupos Montmorilonita e Caulinita, as principais feições de absorção se devem à presença de água (FORMAGGIO, 1999). As bandas de absorção no IVM de 1,4 e 1,9 μm (absorção muito forte) ocorrem devido à presença de água molecular confinada, típica das Montmorilonitas. E no intervalo centrado no IVM em 1,4 e 2,2 μm (absorção forte) são típicas da reflectância da Caulinita, enquanto que a falta de água confinada, em quantidade apreciável, resulta em somente uma banda de absorção em 1,9 μm (absorção fraca).

F. Material de Origem:

As curvas de reflectância para solos desenvolvidos de calcários, de argilitos e de arenitos exibem formas características contrastantes (FORMAGGIO, 1999).

As intensidades de reflectância das rochas ígneas diminuem a partir das formas ácidas, passando pelas intermediárias, pelas básicas e até as ultrabásicas, as quais sempre mostram uma banda de absorção bem definida de ferro-ferroso próximo de 1,0 μm , no IVP. Portanto, áreas geográficas de material de origem similar podem ser mais bem estudadas separadamente quando se objetiva relacionar a reflectância com outros parâmetros do solo como: a cor, a capacidade de troca catiônica, as condições de drenagem interna do solo, a temperatura, a localização (condições de umidade macro-regional) e as condições de superfície, entre outros.

2.3.1.2 Comportamento Espectral das Culturas Agrícolas

As diferentes culturas agrícolas apresentam distintos comportamentos espectrais decorrentes das suas propriedades específicas e de suas condições físicas, tais como: déficit hídrico, senescência, floração, estresse, doenças e ataque de pragas.

No período de plantio as culturas agrícolas apresentam uma baixa reflectância, em decorrência de serem ainda muito jovens e apresentarem poucas folhas. Assim, o solo é quem reflete mais a REM, em comparação às culturas. A modificação desta condição ocorre quando a cultura atinge seu ápice no desenvolvimento e cobre todo o solo, passando a ter uma alta reflectância (FORMAGGIO, 1999).

Em algumas culturas, como o café e citrus, devido sua estrutura foliar não cobrir todo o solo e também pela característica do plantio, que apresenta grande espaçamento, ocorre à adição da contribuição da reflectância do solo no seu comportamento espectral específico.

Outro fator que afeta o comportamento espectral das culturas é o déficit hídrico. Com exemplo, no plantio da soja, a REM é progressivamente diminuída na faixa do IVM e aumentada no IVP, evidenciando não somente a perda de água, mas também o desarranjo do tecido intercelular, pela redução da concentração de clorofila nas folhas (SHORT, 2015).

Com base nos relatos descritos na literatura, fica evidenciada que diferentes culturas agrícolas e características de solo atribuem distintos padrões de comportamento espectral, inferindo a possibilidade de uso do sensoriamento remoto e geoprocessamento no diagnóstico de conflitos de uso e ocupação da terra, bem como a perspectiva de correlação com a qualidade do solo.

2.4 Qualidade do Solo

A qualidade do solo é um termo relativamente recente, que vem sendo empregado na avaliação da sustentabilidade relacionada ao uso e ocupação da terra. Assim, esta corresponde ao elo existe entre a prática agrícola e a agricultura sustentável (SANTANA; BAHIA-FILHA, 1998). Neste contexto, a característica do manejo do solo interfere diretamente no seu potencial produtivo (SILVA et al., 2009).

Dentre os diferentes métodos utilizados na análise da qualidade do solo, até o momento não encontramos um método direto, que seja prático e confiável (KARLEN et al., 1997). De acordo com Araújo (2012), as mudanças na qualidade dos solos têm sido avaliadas por meio da estimativa de indicadores, comparando-os com valores desejáveis (Limite crítico ou *threshold level*) em diferentes intervalos de tempo, específicos para ecossistemas agrícolas, florestais, pecuários e naturais.

Os indicadores fornecem dados da capacidade do solo, que devem ser empregados respeitando a produtividade biológica, a qualidade ambiental, bem com a saúde humana e animal. A qualidade “ideal” de um solo é subjetiva, pois depende de inúmeros fatores, como o do tipo de solo e cultura (CHAER, 2001). Deste modo, os indicadores da qualidade do solo podem ser divididos em três grupos (ISLAM & WEIL, 2000): a) efêmeros, cujas alterações se dão rapidamente no tempo de acordo com o manejo, como a acidez, a disponibilidade de nutrientes e a compactação do solo, b) intermediários, que dependem da influência dos processos que ocorrem no solo, tais como teor de carbono orgânico total, agregação e biomassa microbiana e, c) permanentes, que são inerentes às características do solo, como profundidade, textura e mineralogia.

A avaliação da qualidade dos solos é tarefa complexa, devendo ser realizada em função de inúmeros indicadores específicos denominados atributos, bem como as suas inter-relações, visando caracterizar a perda ou ganho no potencial produtivo de determinado tipo de solo (SANTOS, 2010).

Apesar disso, deve-se estabelecer um índice de qualidade do solo, com intuito de identificar os problemas, bem como realizar a estimativa realística, com o monitoramento das mudanças na sustentabilidade e qualidade ambiental, visando avaliar e adaptar adequadamente as formas de manejo (SOUZA et al., 2003). Ainda, este índice pode ser empregado na avaliação das mudanças no funcionamento do solo ou limitações do ecossistema (SEYBOLD; HERRICK; BREJDA, 1997).

2.4.1 Atributos Físicos e Químicos do Solo

O diagnóstico da qualidade do solo pode ser realizado com base em indicadores químicos e físicos, com o intuito de propiciar incremento e/ou manutenção da produção agrícola e da qualidade ambiental (MARTINAZZO, 2006). A MO é considerada o fator de maior importância na determinação da qualidade do

solo, por ser sensível às práticas de manejo do solo, em virtude de sua suscetibilidade de alteração em relação às práticas de manejo e por correlacionar-se com a maior parte dos atributos do solo (MIELNICZUCK, 1999), podendo ser avaliada por meio do teor de carbono orgânico total.

Vários estudos têm apontado que a MO é um dos melhores indicadores de qualidade de solo, tendo em vista que várias funções e processos biológicos, físicos e químicos, que ocorrem no solo, apresentando relação direta com a presença de matéria orgânica (CARTER, 2001). Além disso, apresenta importante papel na formação de agregados do solo, bem como na estabilização destes (BAYER; MIELNICZUK, 1997), pois funciona como agente cimentante.

Encontramos relatos na literatura, que a MO pode deter o declínio da qualidade estrutural de solos cultivados, bem como auxiliar na recuperação de áreas degradadas, por meio da adesão a sistema agrícola com menor revolvimento do solo, associada à alta taxa de adição de resíduos orgânicos (PALADINI; MIELNICZUK, 1991). Ainda, evita o aumento da proporção de microagregados, os quais podem levar a perda da qualidade do solo.

A disponibilidade de nutrientes às raízes das plantas, apresenta relação direta com o pH do solo, propiciando condições favoráveis ou de toxidez, decorrentes do desenvolvimento de micro-organismos, os quais podem promover transformações positivas, melhorando as condições do solo, ou negativas, causando doenças (MELLO & DIAS, 1998).

Neste sentido, é essencial incluir a avaliação do pH nas análises dos aspectos químicos de qualidade do solo, a qual permite correlacionar os achados com a capacidade do solo em suprir nutrientes e funcionar como um tampão contra aditivos químicos e corretivos (DORAN; PARKIN, 1996). Ainda, estas medidas expressam a disponibilidade de nutrientes, como cálcio, magnésio, fósforo, potássio e micronutrientes, permitindo realizar análises comparativas da qualidade de solo entre diferentes sistemas de manejos (ARAÚJO et al. , 2012).

A porosidade do solo tem sido empregada como indicador da qualidade do solo, por tratar-se de propriedades dinâmicas, suscetíveis ao uso e de fácil determinação, estando relacionadas à compactação e à relativa restrição ao crescimento radicular (ARSHAD; LOWER; GROSSMAN, 1996).

A característica do manejo do solo pode intervir na sua porosidade, podendo propiciar: a) redução dos macroporos, relacionado principalmente à pressão

mecânica de máquinas agrícolas; b) à compressão do ar nos microporos dos agregados, durante os ciclos de umedecimento e secagem do solo; c) à força cinética da gota da chuva; d) à aração profunda; e) ao entupimento dos microporos; f) ao baixo conteúdo de MO e nutrientes (AGUIAR, 2008).

A análise da textura é imprescindível para a classificação do solo e a predição do manejo e da aptidão de uso. Ainda, a textura é fator determinante das propriedades de retenção e capacidade de armazenamento de água e nutrientes, bem como da distribuição de poros e, conseqüentemente, das propriedades de condução de água e gases; afetando a dinâmica das trocas com plantas e atmosfera (REICHARDT; TIMM, 2012; FELLER; BEARE, 1997).

A textura também interfere na resistência do solo à ação da movimentação do solo por implementos agrícolas, bem como nas propriedades térmicas do solo, tais como: capacidade calorífica e condutividade térmica, estrutura do solo, teor de nutrientes e de matéria orgânica.

Contudo, é indispensável à avaliação dos atributos físicos e químicos, mas deve-se ressaltar que estes isoladamente não constituem adequado indicador de qualidade do solo, devendo ser associados com outras propriedades ou características do solo.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Diagnosticar áreas de pastagens na bacia do rio Uberaba, Veríssimo-MG e associar com a fertilidade e atributos físicos do solo, por meio de abordagem aprimorada de sensoriamento remoto baseada em NDVI, considerando os efeitos da formação geológica e da sazonalidade.

3.2 Objetivos Específicos

1. Avaliar o efeito da formação geológica e da sazonalidade no processo de mapeamento e diagnóstico de pastagens degradadas no município de Veríssimo-MG;
2. Correlacionar o nível de degradação com variáveis espaciais dos atributos físicos e químicos dos solos;

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo

O município de Veríssimo (Figura 5), Minas Gerais, está localizado na bacia do rio Uberaba, na região do Triângulo Mineiro, delimitado pelas coordenadas geográficas entre os paralelos 19°31'55" a 19°49'20" de latitude sul e entre os meridianos 48°08'36" e 48°28'11" a oeste de Greenwich, distante a 43 km de Uberaba; possuindo uma área total de 1031,6 km² (ALMEIDA & VALLE JUNIOR, 2013).

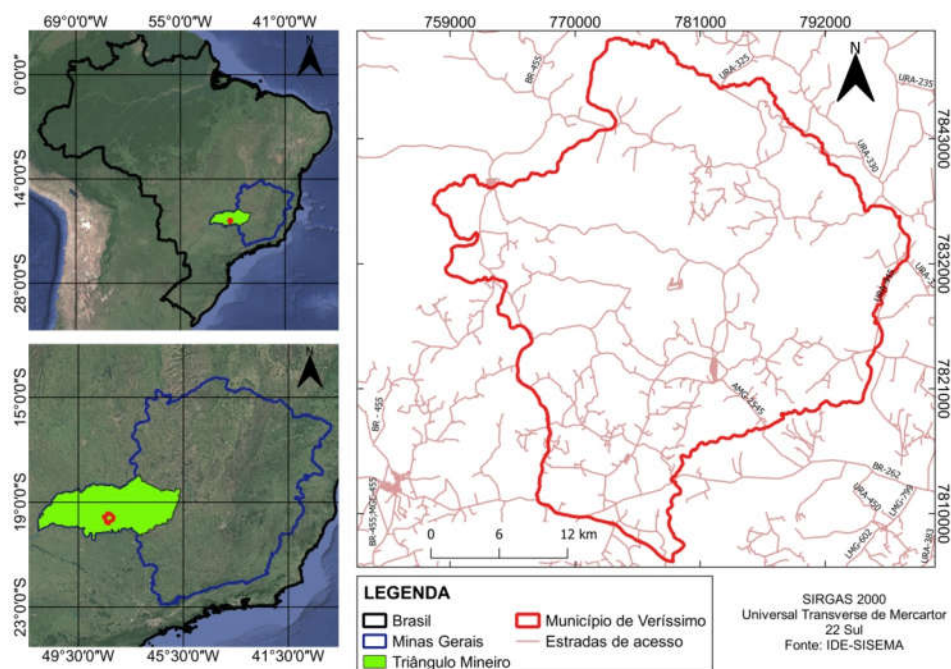


Figura 5: Localização Município de Veríssimo - MG.

Fonte: acervo próprio.

A bacia do rio Uberaba está situada em um planalto denominado Arenito, no Planalto Basáltico da bacia do rio Paraná, com superfícies planas ou suavemente onduladas em forma sedimentar (arenito) e rochas vulcânicas (basálticas). As áreas de sedimentação pertencem à formação Grupo Bauru do Cretáceo, dando origem às formações geológicas Uberaba e Marília (Figura 6), enquanto as áreas basálticas relacionam-se a formação Serra Geral (CRUZ, 2003). Os solos neste planalto são caracterizados predominantemente por textura variada, de areia a argilosos, apresentando distintos níveis de fertilidade caracterizados por textura variando de

areia a argilosa e níveis de fertilidade distintos (NISHIYAMA, 1998). De acordo com a classificação da FAO, esses solos são denominados Latossolos, Argissolos e Gleissolos (SIQUEIRA et al., 2017).

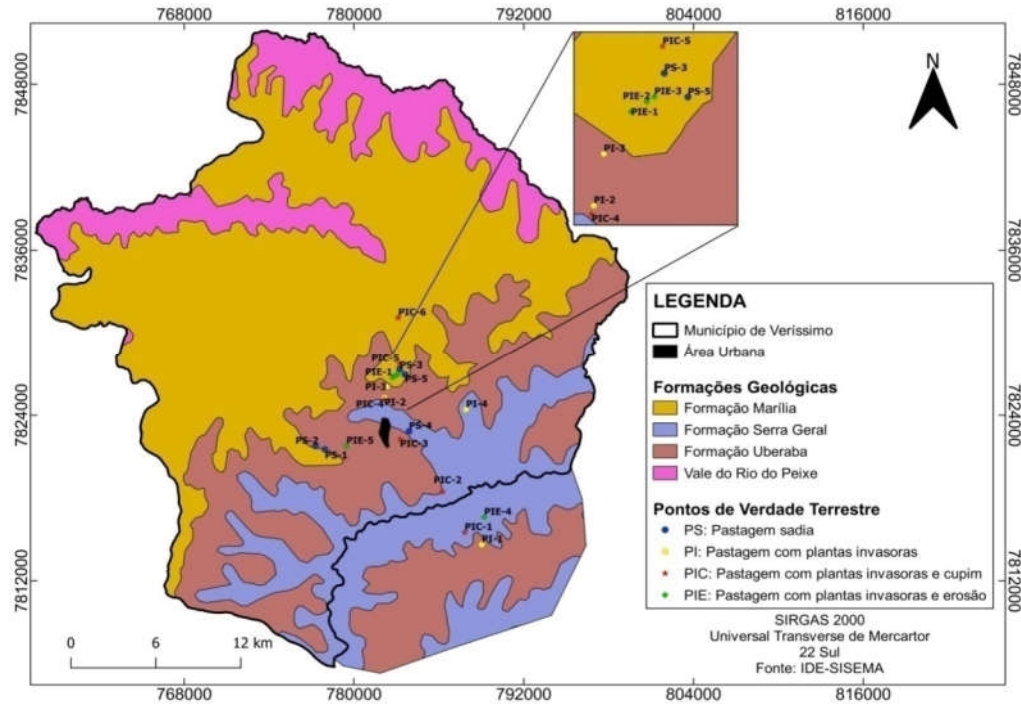


Figura 6: Formação Geológica Município de Veríssimo-MG.

Fonte: acervo próprio.

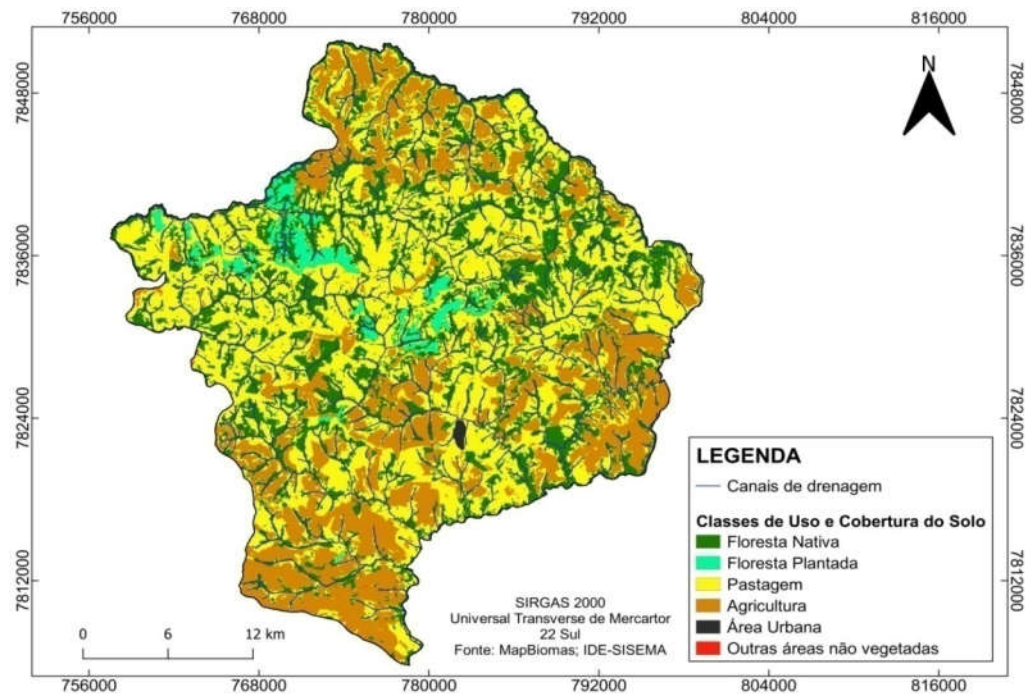


Figura 7: Mapa de Uso e Ocupação do Solo da Bacia do Rio Uberaba

A figura 7 apresenta mapa de uso e ocupação do solo no município de Veríssimo.

4.2 Mapeamento Pastagens Degradadas

O método para mapeamento das fisionomias de pastagens degradadas segue o fluxo estabelecido por Valle Júnior et al., 2019, em que estabelece três etapas essenciais para realização do diagnóstico do nível de degradação do solo.

A primeira etapa corresponde ao levantamento de campo para identificar das fisionomias de pastagens degradadas (Figura 8). Assim, foram avaliadas as seguintes fisionomias de pastagem: (A) Pasto Sadio (PS), com pasto verde e alto com cobertura homogênea; (B) Pasto com plantas Invasoras (PI), com leve degradação; (C) Pasto com plantas Invasoras e Cupim (PIC), com moderada degradação; (D) Pasto com plantas Invasoras e Erosão (PIE), com elevada degradação, caracterizada por extensas áreas sem presença de pastagem.

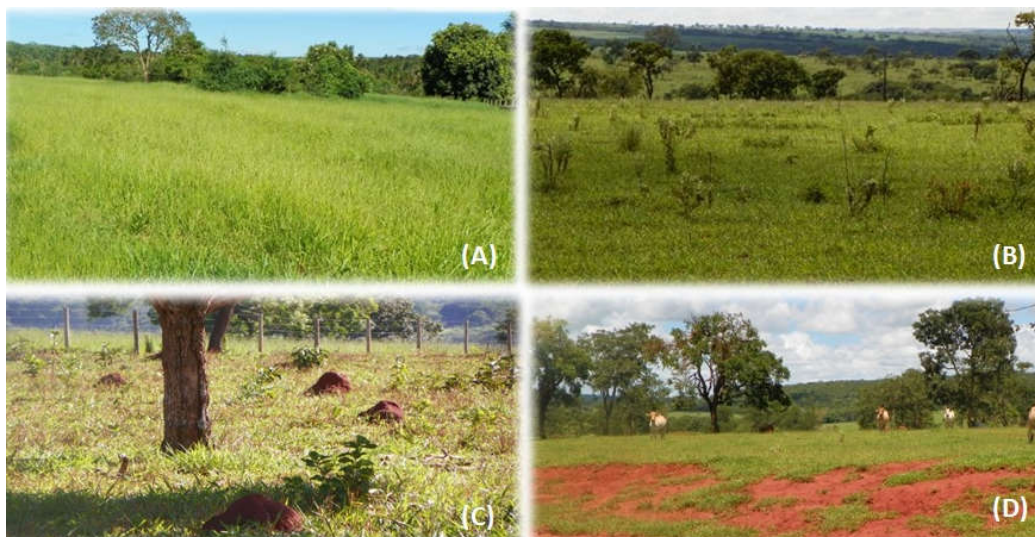


Figura 8: Fisionomias de Pastagens: A) PS= pasto sadio; B) PI= pasto com plantas Invasoras; C) PIC= pasto com plantas invasoras e cupim; D) PIE= pasto com plantas invasoras e erosão.

Fonte: acervo próprio.

Cinco polígonos de cada fisionomia de pastagens foram selecionados em verdade de campo, totalizando 22 polígonos; no mínimo três de cada fisionomia de

pastagem (Tabela 2). Assim, a caracterização dos solos dos polígonos foi realizada por meio da coleta de amostras de solo para análise da fertilidade e de atributos físicos.

Tabela 2: Coordenadas Geográficas e Formação Geológicas dos Polígonos

Pontos	X (mE)	Y (mS)	Identificação	Formação Geológica
1	777948	7821530	PS-1	Uberaba
2	777287	7821769	PS-2	Uberaba
3	783239	7827340	PS-3	Marília
4	783890	7822846	PS-4	Serra Geral
5	783600	7826967	PS-5	Marília
6	789040	7814632	PI-1	Uberaba
8	782159	7825267	PI-2	Uberaba
9	782313	7826077	PI-3	Uberaba
10	769850	7806709	PI-4	Serra Geral
11	787827	7815515	PIC-1	Serra Geral
12	786148	7818514	PIC-2	Serra Geral
13	783260	7822269	PIC-3	Serra Geral
14	782123	7825133	PIC-4	Uberaba
15	759459	7788871	PIC-5	Marília
16	783128	7831126	PIC-6	Marília
18	782729	7826737	PIE-1	Marília
19	782972	7826896	PIE-2	Marília
20	783086	7826971	PIE-3	Marília
21	772332	7806671	PIE-4	Serra Geral
22	755855	7806917	PIE-5	Uberaba

Grupos: PS= pasto sadio; B) PI= pasto com plantas invasoras; C) PIC= pasto com plantas invasoras e cupim; D) PIE= pasto com plantas invasoras e erosão.

Fonte: acervo próprio.

Os 22 polígonos foram georreferenciados, com caracterização dos solos na formação Uberaba e Serra Geral. Na formação Marília não foi possível reconhecer polígonos típicos da fisionomia pasto com plantas Invasoras. Logo, a caracterização do solo não foi realizada.

A segunda etapa consiste na elaboração de um mapa NDVI das pastagens (Figura 9), que resulta de uma combinação de um mapa de cobertura / uso ocupação do solo e um mapa NDVI, ambos derivados de imagens de satélite, representando o mesmo período.

Em primeiro lugar, elaborou-se o mapa de NDVI da área do estudo e de um mapa de combinação dos dados de cobertura e uso ocupação do solo, no mesmo

período, 2013 a 2016. Na sequência, realizou-se a determinação dos limites de pastagens, elaborando um mapa de varredura nulo, ou seja, foram zerados em cada pixel, para determinação de um mapa de fisionomia inicial das pastagens.

No mapa de NDVI os polígonos das diferentes fisionomias de pastagens foram recortados, mediante comando "*buffer*", sendo realizadas as comparações dos valores mínimo-máximo de cada pixel. Na ocasião, se o pixel ficar localizado dentro desse intervalo, a comparação é considerada bem sucedida. Caso contrário, permanece inalterado. Assim, as comparações do pixel nos intervalos "*buffers*" são replicadas até que todas as etapas de tempo sejam avaliadas, em que sempre que a comparação é bem sucedida o pixel determina uma unidade (+1).

Deste modo, no mapa foram atribuídos valores de pontuação, sendo estabelecido que 0 não pertence à nenhuma fisionomia, enquanto que valores > 0 pertence à fisionomia. Uma tarefa subjetiva foi a definição de um limite mínimo, para inclusão em determinada fisionomia. Foi adotado como limite o valor mínimo 3, em que os pixels com valores inferiores foram zerados, sendo mantido os demais valores. Assim, foram estabelecidas seis faixas de valores: 3-6; 7-9; 10-12; 13-15; 16-18; 19-21.

No mapa de NDVI pode ser observada graduação de cor para cada intervalo, em uma rampa vermelho-verde-azul. Deste modo, a cor azul descreve setores em que a fisionomia foi extrapolada com maior precisão dos valores de referência, em decorrência do elevado número de repetições ao longo do ano. Entretanto, a cor vermelha corresponde a extrapolação de menor precisão, correspondendo ao limiar, em que foi adotado com referência o mínimo de três repetições ao longo do ano.

Na terceira etapa, consiste na validação dos dados utilizados para gerar os mapas. Assim, os valores de um parâmetro discriminante dos locais de validação são comparados com os valores característicos, mínimo-máximo, das fisionomias de cada formação geológica. Ao final, o mapa é considerado validado quando se obtém coincidência $> 85\%$ dos valores característicos, sendo que índices menores requer ajustes, podendo não ser aplicável às fisionomias propostas.

4.3 Fertilidade e Atributos Físicos do Solo

Em campo, na mesma ocasião em que foram coletadas as amostras indeformadas com anéis volumétricos, para análise dos atributos físicos do solo,

foram coletas amostras deformadas por meio de trado tipo holandês, na profundidade de 0 - 0,20 m, para análise da fertilidade do solo. Em cada polígono foi estabelecido 5 pontos de coleta, com intervalos regulares de aproximadamente 20 m, totalizando 110 amostras.

As amostras indeformadas foram coletas com uso de anéis volumétricos com volume interno aproximadamente de $8,8 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, na profundidade de 0 – 0,10 m, com o posicionamento do centro dos anéis volumétricos a profundidade de 0,05 m, desprezando o solo na camada superficial (0 - 0,025 m) e da camada profunda (0,075 – 0,10m).

A densidade do solo foi determinada pelo método do volume conhecido. A microporosidade pelo método da mesa de tensão em 60%, com pesagens antes e após secagem em estufa a 105°C, durante 24 horas, com determinação do volume de microporos contidos na amostra. A porosidade total (Pt) foi obtida pela relação volumétrica entre a massa do solo saturado e a massa do solo seco, com a determinação da Percentagem de Saturação em Volume (Ps), onde a $P_t = P_s$ (EMBRAPA, 1997).

A macroporosidade foi obtida pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade, enquanto, que a composição granulométrica dos solos foi determinada através da dispersão com NaOH (0,1 mol L⁻¹), mediante agitação lenta durante 16 horas, sendo o conteúdo de argila obtido pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997).

Nas análises químicas foram determinados os teores de cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺) e potássio (K⁺) trocáveis, fósforo (P) disponível e a acidez potencial (H+Al), com utilização do método da resina trocadora de íons (RAIJ et al., 2001). A acidez trocável (Al³⁺) foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Camargo et al. (1986). O pH foi determinado potenciometricamente utilizando-se relação 1:2,5 de solo em água (EMBRAPA, 1997). O carbono orgânico foi determinado pelo método de Walkley-Black modificado por Yoemans e Bremner (1988), a matéria orgânica, por sua vez, foi estimada com base no carbono orgânico. O teor de enxofre (S) foi determinado pelo método extrator de acetato de cálcio, de acordo com Camargo et al. (1986).

4.4 Análise dos Dados

O diagnóstico das áreas de pastagens foi realizado utilizando o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), por meio de imagens orbitais captadas pelo sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), a bordo da Plataforma Terra.

Dentre os produtos MODIS relacionados ao estudo da vegetação, o MOD13Q1 – Grades de índices de vegetação (Máximo NDVI e MVI integrado) – contém os índices de vegetação NDVI e EVI (*Enhanced Vegetation Index*), produzidos globalmente com resolução de 250 m, em composições de imagens de 16 dias, disponíveis gratuitamente no site Earth Explorer da USGS (United States Geological Survey). Além disso, são oferecidas imagens corrigidas dos efeitos atmosféricos (nuvens, aerossóis, entre outros) e georreferenciadas.

Na análise foram utilizados 92 arquivos de varredura NDVI - MOD13Q1, no período de 2013 a 2016, sendo 23 imagens por ano,

O processamento dos dados e elaboração de mapas foi realizado utilizando software Quantum GIS, versão 2.18. Na ocasião, foram elaborados polígonos com raio de 100 m, mediante comando "Buffer", com realização de recortes dos NDVIs, possibilitando isolar as fisionomias de pastagens dos municípios de Veríssimo-MG, distintamente nas formações: Uberaba, Marília e Serra Geral.

O cálculo dos valores médios de NDVI dentro de uma fisionomia de pastagem, para cada formação geológica, foi realizado de acordo com número de polígonos (Tabela 2).

Cada imagem do conjunto de dados de séries temporais foi analisada com realização do cálculo da média do NDVI, por meio da função Zonal Statistics do Quantum GIS, das diferentes fisionomias de pastagens nas formações geológicas.

As médias de cada fisionomia de pastagens foram ajustadas ao modelo de regressão cúbica, por meio da avaliação das assinaturas temporais, por meio de equações polinomiais, utilizando *software* Minitab, versão 17. Nos gráficos de dispersão, a variável dependente (y) representa o NDVI, enquanto a variável independente (x) representa as séries temporais em 23 intervalos de tempo, correspondendo o número de varredura por ano.

O Erro residual de cada modelo foi obtido pela seguinte fórmula (Zar, 1999):

$$\text{Erro Residual (\%)} = \frac{\sum \frac{\text{Dado Real} - \text{Dado Estimado}}{\text{Dado Real} + \text{Dado Estimado}}}{\sum} \times 100$$

4.5 Análises Estatísticas

A análise estatística dos dados foi realizada por meio de análises multivariadas (ANOVA), seguida de teste de Tukey, para determinação das diferenças significativas. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando *software* Minitab, versão 17, adotando nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$).

5 RESULTADOS

5.1 Padrões NDVI

Os padrões espectrais do NDVI são ilustrados na Figura 9. A imagem (a) se refere ao 1º dia do ano (janeiro) e foi selecionada para representar o período chuvoso, enquanto a imagem (b) se refere 237º dia do ano (setembro) e representa o período seco.

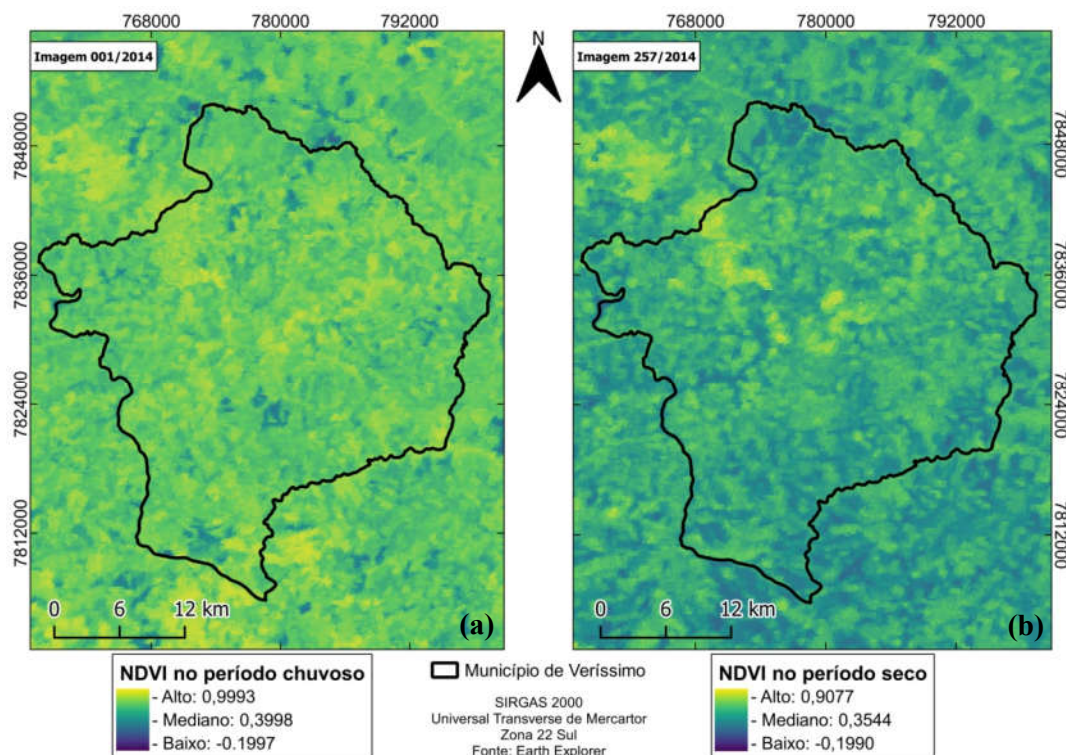


Figura 9: Mapa de NDVI do município de Veríssimo-MG, no (a) 1º dia do ano de 2014 (janeiro; período chuvoso); e (b) 237º dia de 2014 (setembro; período de seca). Os valores NDVI são geralmente mais altos no período úmido. Fonte: acervo próprio.

No intervalo de janeiro a setembro os valores de NDVI são geralmente maiores em decorrência do período chuvoso, representando a estação com maior vigor e crescimento das plantas, como pode ser observado de acordo com os padrões temporais do NDVI das diferentes fisionomias de pastagens nas formações Uberaba, Marília e Serra Geral (Figura 10): Pasto Sadio (a, b, c); Pasto com Plantas Invasoras (d, e); Pasto com Plantas Invasoras e Cupim (f, g,h); Pasto com Plantas Invasoras e Erosão (i, j, l).

A resposta do NDVI à sazonalidade é clara nas três formações e em ambas as fisionomias. Todas as figuras mostram uma relação não linear entre o NDVI e o tempo, sendo observados maiores valores no período chuvoso e os menores no período seco (Fig. 9). No entanto, há alguma diferenciação entre formações geológicas e estágios de degradação, como observado para pastagens saudáveis (Fig. 10 a, b, c).

Na tabela 3 pode ser evidenciada tal afirmação, ao observar o intervalo de valores médios de NDVI para pasto sadio, em que a média na formação de Marília é maior que na formação Serra Geral e Uberaba, enquanto os valores mínimos são em média maiores na Formação Uberaba que nas formações Serra Geral e Marília.

Tabela 3: NDVI das fisionomias de pastagens nas formações geológicas

	Valores	Uberaba (Média ± Desvio Padrão)	Marília (Média ± Desvio Padrão)	Serra Geral (Média ± Desvio Padrão)
PS	Máximo	0,556 ± 0,141	0,588 ± 0,150	0,576 ± 0,137
	Médio	0,524 ± 0,125	0,557 ± 0,136	0,533 ± 0,127
	Mínimo	0,471 ± 0,182	0,464 ± 0,169	0,456 ± 0,177
PI	Máximo	0,525 ± 0,145	#	0,541 ± 0,227
	Médio	0,521 ± 0,130	#	0,529 ± 0,221
	Mínimo	0,456 ± 0,169	#	0,483 ± 0,253
PIC	Máximo	0,485 ± 0,148	0,510 ± 0,177	0,558 ± 0,152
	Médio	0,466 ± 0,136	0,505 ± 0,165	0,529 ± 0,144
	Mínimo	0,408 ± 0,173	0,454 ± 0,206	0,466 ± 0,187
PIE	Máximo	0,425 ± 0,196	0,578 ± 0,138	0,522 ± 0,135
	Médio	0,406 ± 0,186	0,539 ± 0,123	0,500 ± 0,125
	Mínimo	0,351 ± 0,189	0,485 ± 0,184	0,454 ± 0,170

PS= Pasto Sadio; PI= Pasto com plantas Invasoras; PIC= Pasto com plantas Invasoras e Cupim; PIE= Pasto com plantas Invasoras e Erosão; # Não foi encontrado áreas de pastagens com a fisionomia PI na formação Marília.

Fonte: acervo próprio.

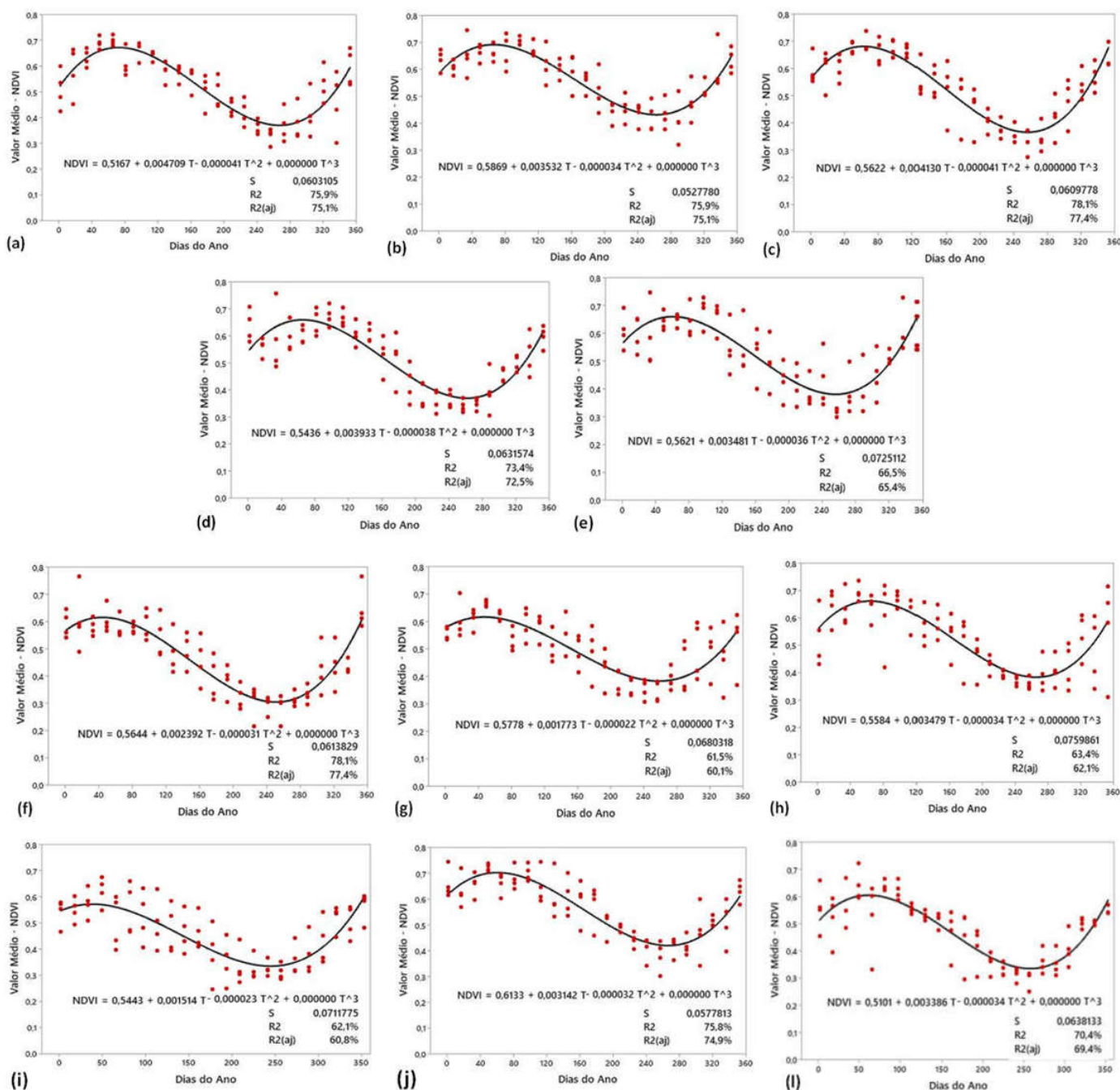


Figura 10: Padrões temporais do NDVIbuffer no período de 2013 a 2016. Pasto Sadio (PS) - Uberaba (a), Marília (b), Serra Geral (c); Pasto com plantas Invasoras (PI) - Uberaba (d), Serra Geral (e); Pasto com plantas Invasoras e Cupim (PIC) - Uberaba (f), Marília (g), Serra Geral (h); Pasto com plantas Invasoras e Erosão - Uberaba (i), Marília (j), Serra Serral (l).
Fonte: acervo próprio.

5.2 Caracterização do Solo

Os dados da caracterização do solo são apresentados na Tabela 4, permitindo a diferenciar pelo menos duas fisionomias de pastagens com o resultado do alumínio trocável (Al^{3+}), fósforo (P), acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$), matéria orgânica (MO), carbono orgânico (CO), densidade e macroporosidade. Ainda, esses parâmetros permitem diferenciar os estágios de degradação do solo, com exceção do Alumínio na Formação Uberaba, e do carbono orgânico e macroporosidade na formação Serra Geral.

Os parâmetros de fertilidade do solo diminuem de pastagens saudáveis para degradadas, com exceção do alumínio trocável (Al^{3+}) e acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$), que apresentam aumento da concentração nas áreas degradadas. Ocorreu expressivo redução de 18,33 % da matéria (4,25 dag/kg) e carbono orgânico (2,451 dag/kg) na formação Uberaba, enquanto que na formação Marília (4,996 e 2,898 dag/kg, respectivamente) esta redução foi de 22,43 % e 32,88 % na formação Serra Geral (7,85 e 4,551 dag/kg, respectivamente), em comparação aos dados das áreas de pasto sadio.

Outros declínios marcantes entre pastagens saudáveis e a fisionomia mais degradada foi evidenciada para o fósforo (declínio de 19 – 42%, em média) e pH (1 – 14%). Os valores de pH indicam presença de acidez elevada inclusive nas áreas de pasto sadio, sendo observado comportamento atípico para a capacidade de troca catiônica (CTC) e o potássio.

Tabela 4: Caracterização dos Solos das fisionomias de pastagens das formações Uberaba, Marília e Serra Geral.

Média ± Desvio Padrão		pH	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CTC	H+Al	SB	K ⁺	P	CO	MO	Umidade	Microp.	Macrop.
			cmol/dm3		mg/dm3					dag/kg			%		
Uberaba	PS	4,416 ± 0,2137	7,75 a ± 2,63	4,2 a ± 1,581	1,333 ± 0,321	26,2 ± 5,06	19,92 a ± 5,59	6,278 a ± 1,524	0,745 ± 0,576	6,072 b ± 0,772	13,45 a ± 2,45	23,19 a ± 4,22	26,166 a ± 2,051	0,394 ± 0,023	0,024 b ± 0,00548
	PI	4,548 ± 0,3064	4,094 b ± 2,338	5,647 a ± 3,116	2,464 ± 1,24	24,61 ± 4,19	15,83 b ± 3,73	8,79 a ± 4,56	0,675 ± 0,593	10,498 a ± 3,093	9,043 b ± 1,653	15,59 b ± 2,85	24,281 a ± 2,956	0,372 ± 0,0457	0,051 b ± 0,03035
	PIC	4,38 ± 0,1852	4,871 b ± 1,226	3,334 a ± 1,032	1,7569 ± 0,1861	22,82 ± 3,73	17,36 a ± 4,46	5,458 b ± 0,999	0,3672 ± 0,1325	5,474 b ± 0,561	10,989 b ± 0,798	18,94 b ± 1,375	22,446 b ± 1,869	0,346 ± 0,0219	0,086 a ± 0,0344
	PIE	4,232 ± 0,1279	11,301 a ± 1,858	2,124 b ± 0,446	1,2 ± 0,447	28,45 ± 4,22	24,51 a ± 3,77	3,943 b ± 0,952	0,6182 ± 0,165	3,867 b ± 0,323	10,238 b ± 1,098	17,65 b ± 1,893	25,058 a ± 1,974	0,378 ± 0,0295	0,054 a ± 0,0261
Marília	PS	4,9628 a ± 0,0952	4,969 a ± 0,9720	10,080 ± 1,5610	3,2690 ± 0,9840	28,77 b ± 4,3700	18,31 a ± 3,4100	13,477 a ± 2,2000	0,4357 a ± 0,1748	7,835 a ± 2,7070	12,92 a ± 1,821	22,274 a ± 3,1390	25,272 a ± 2,4350	0,363 a ± 0,0164	0,1070 a ± 0,0327
	PIC	4,2735 c ± 0,1992	1,666 b ± 0,9410	6,8990 ± 2,7840	3,2870 ± 0,5810	27,54 b ± 7,3500	15,82 b ± 5,0400	11,821 b ± 2,2400	1,018 b ± 0,3133	5,526 b ± 0,5850	10,022 b ± 1,055	17,278 b ± 1,8180	21,661 b ± 1,5820	0,313 a ± 0,0157	0,0660 b ± 0,0386
	PIE	4,4900 b ± 0,2061	6,311 a ± 3,9190	9,937 ± 3,7990	4,605 ± 1,7530	38,59 a ± 6,4200	22,18 a ± 4,3500	16,42 a ± 5,3300	1,873 b ± 1,0980	12,88 a ± 4,2700	11,7 a ± 2,127	20,17 a ± 3,6680	22,327 b ± 2,9600	0,334 b ± 0,0280	0,0860 b ± 0,0184
Serra Geral	PS	4,899 a ± 0,2201	7,980 a ± 2,7100	4,326 b ± 1,6290	1,373 b ± 0,3310	26,980 ± 5,2200	20,52 a ± 5,7600	6,466 b ± 1,5700	0,767 ± 0,594	5,638 ± 0,7950	13,85 a ± 2,52	23,88 a ± 4,3500	26,952 a ± 2,114	0,404 a ± 0,0230	0,026 a ± 0,00548
	PI	4,5485 b ± 0,3280	3,14 b ± 3,040	8,56 a ± 1,5240	3,428 a ± 1,1720	27,610 ± 4,4000	14,52 b ± 3,8000	13,09 a ± 2,3100	1,107 ± 0,644	13,684 ± 1,3940	10,087 b ± 0,544	17,39 b ± 0,9380	22,8 ± 2,4300	0,342 b ± 0,0110	0,08 a ± 0,0283
	PIC	4,552 b ± 0,2213	3,013 b ± 1,8640	3,728 b ± 2,1010	1,547 b ± 0,5110	20,830 ± 4,590	15,1 b ± 3,9300	5,73 b ± 2,8200	0,457 ± 0,289	5,520 ± 0,4530	9,299 b ± 1,373	16,03 b ± 2,3700	23,950 b ± 3,2900	0,374 a ± 0,0297	0,024 b ± 0,0114
	PIE	4,4197 a ± 0,1337	11,080 a ± 2,600	2,207 b ± 0,4230	1,217 b ± 0,4330	28,030 ± 6,0000	24,02 a ± 5,4900	4,014 b ± 0,9450	0,5907 ± 0,2108	4,2430 ± 1,034	10,72 b ± 1,034	18,481 b ± 1,7820	26,1780 ± 2,2500	0,40 a ± 0,0228	0,0433 b ± 0,01033

Os valores médios associados à diferentes letra minúscula apresentam diferenças estatisticamente significativa de acordo com o teste de Tukey (ANOVA; p < 0,05). As áreas sombreadas em cinza representam os principais parâmetros com diferenças em duas fisionomias de pastagens. Abreviaturas: CTC - capacidade de troca catiônica; H+Al - acidez pontencial; SB - soma de bases; MO - matéria orgânica; CO - carbono orgânico; Microp - microporosidade do solo, Macrop - macroporosidade do solo. Grupos: PS= Pasto Sadio; PI= Pasto com plantas Invasoras; PIC= Pasto com plantas Invasoras e Cupim; PIE= Pasto com plantas Invasoras e Erosão.

Fonte: acervo próprio.

O parâmetro de alumínio trocável e acidez potencial indicam acentuada elevação da acidez dos solos para as formações Uberaba, Marília e Serra Geral. O alumínio trocável apresentou aumento de 2,879 cmol/dm³ (37,2 %) na formação Uberaba, 3,303 cmol/dm³ (66,47 %) na formação Marília e 4,967 cmol/dm³ (62,24 %) na formação Serra Geral. Com relação à acidez potencial foi observado aumento de 2,56 cmol/dm³ (12,85 %) na formação Uberaba, 2,49 cmol/dm³ (13,6 %) na formação Marília e 5,42 cmol/dm³ (26,241 %) na formação Serra Geral. Todas as comparações em relação ao pasto sadio.

Os parâmetros físicos do solo indicam redução da umidade (Tabela 4) e acentuada redução da porosidade do solo, caracterizada pela relação da proporção entre macro:microporos. A proporção ideal é 1:2, levando em consideração que as raízes da maioria das culturas podem crescer com macroporosidade acima de 10% e que o conteúdo de água armazenada deve ser maior que o de ar (KLEIN; LIBARDI, 2002). Portanto, no estudo foi observada proporção média macro:microporos de aproximadamente 1:8 na formação Uberaba, 1:4 na formação Marília e 1:11 na formação Serra Geral.

Com base nos resultados da caracterização do solo a discriminação das fisionomias é geralmente adequada entre pasto sadio e a fisionomia mais degradada. Os parâmetros discriminantes mais adequados são matéria e carbono orgânico, fósforo, alumínio trocável, acidez total, pH, umidade e macroporosidade.

5.3 Mapa de Pastagem Degradada

A figura 10 descreve o comportamento do NDVI de pastagem degradadas (d, f, g, h, i, j, l), em que a figura 11 representa o mapa por extrapolação dos níveis de degradação de pasto no município de Veríssimo-MG. No mapa as áreas cinza representam pastagens saudáveis e as áreas coloridas com moderada degradação.

No total, esses pixels cobrem uma área de aproximadamente 387 km² de área de pastagens no município de Veríssimo, em que 41,9% são de pastos sadios (162,1 km²), enquanto 58,1% (224,9 km²) são de pastagens degradadas e/ou em processo de degradação.

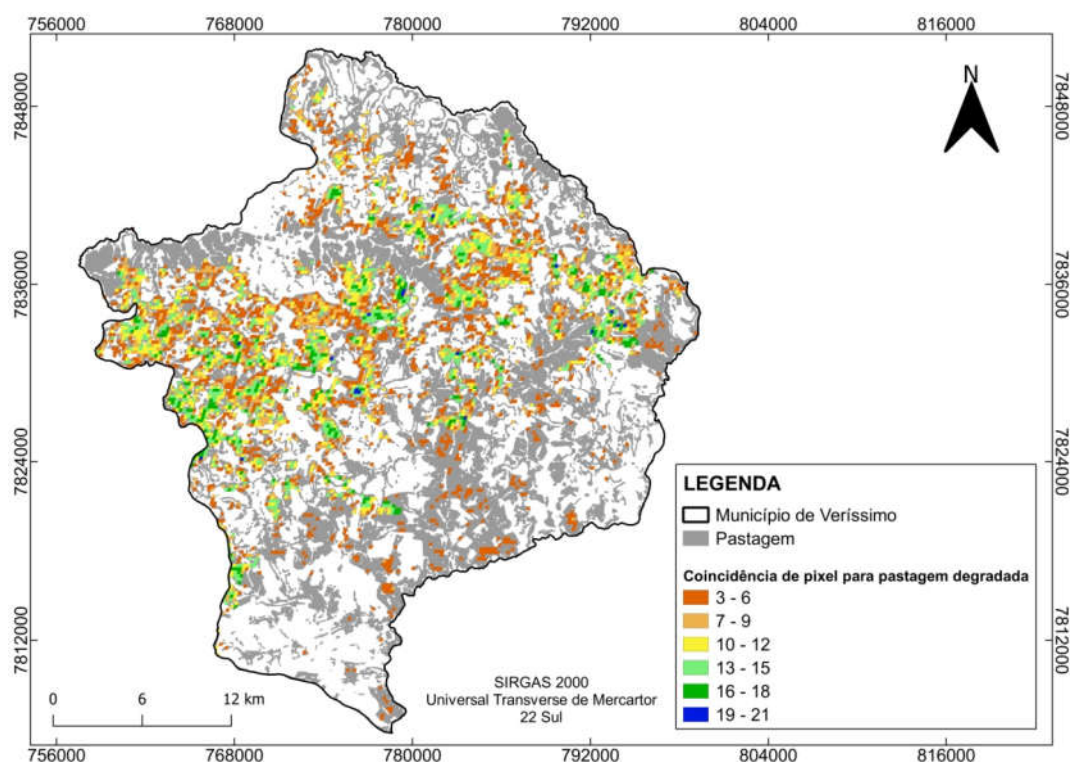


Figura 11: Mapa de pastagem degradada extrapolado a partir da comparação de imagens de NDVI.

Fonte: acervo próprio.

As áreas com presença de degradação (Figura 12), das quais 54,4% na formação Marília (210,5 km²), 1,6% Serra Geral (6,05 km²) e 2,2% Uberaba (8,4 km²). A escala de cores vermelha-verde-azul gradua a faixas de coincidência de pixel, em que os pixels vermelhos representam as faixas com menor precisão, enquanto que verdes e azul representam as faixas com maior precisão.

Com base no Mapa de pastagem degradada extrapolado a partir de comparações de imagens NDVI, em que foi adotado como confiável o limite de 3 repetições, foi possível estimar as áreas de coincidência do pixel para pastagens degradadas no município de Veríssimo (Figura 12). No limite de extrapolação, 3 repetições, foi de 22,7 km². Para maiores precisões, as porções de área foram 19,5 km² (4 repetições), 20,8 km² (5), 18,6 km² (6), 16,3 km² (7), 15,4 km² (8), 15,8 km² (9), 16,4 km² (10), 21,0 km² (11), 14,6 km² (12), 13,8 km² (13), 11,4 km² (14), 9,8 km² (15), 7,5 km² (16), 5,2 km² (17), 2,5 km² (18) e 1,0 km² (19–21 repetições). É importante ressaltar que apesar do número ser relativamente pequeno de repetições, o número máximo possível é 23, correspondendo ao número total de imagens de NDVI por ano, obtidas na varredura do MOD13Q1.

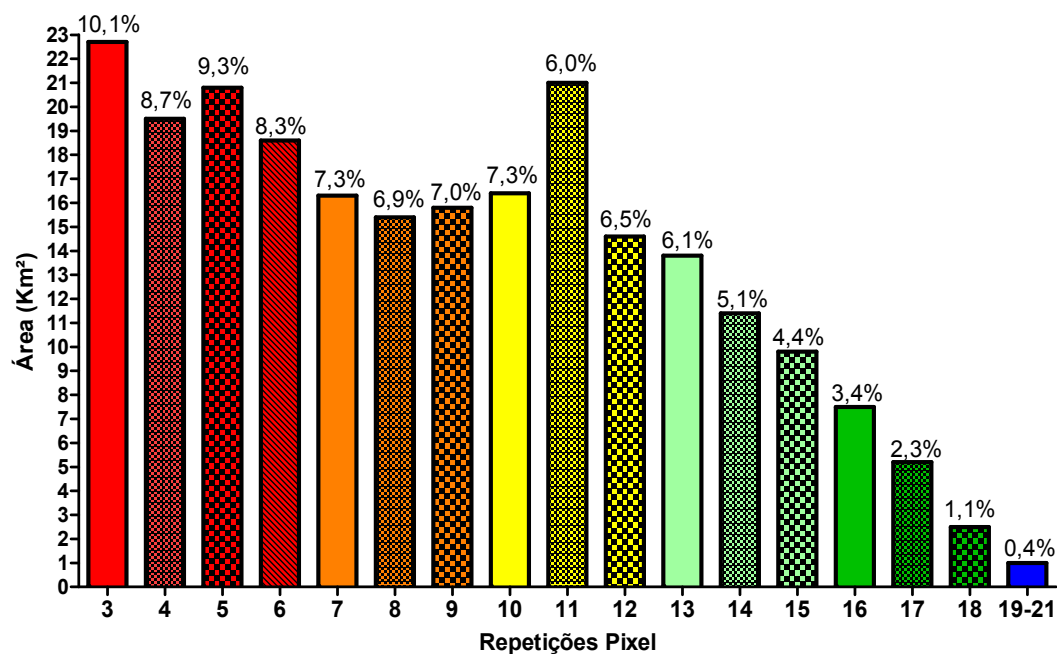


Figura 12: Áreas de coincidência do pixel para pastagens degradadas

Fonte: acervo próprio.

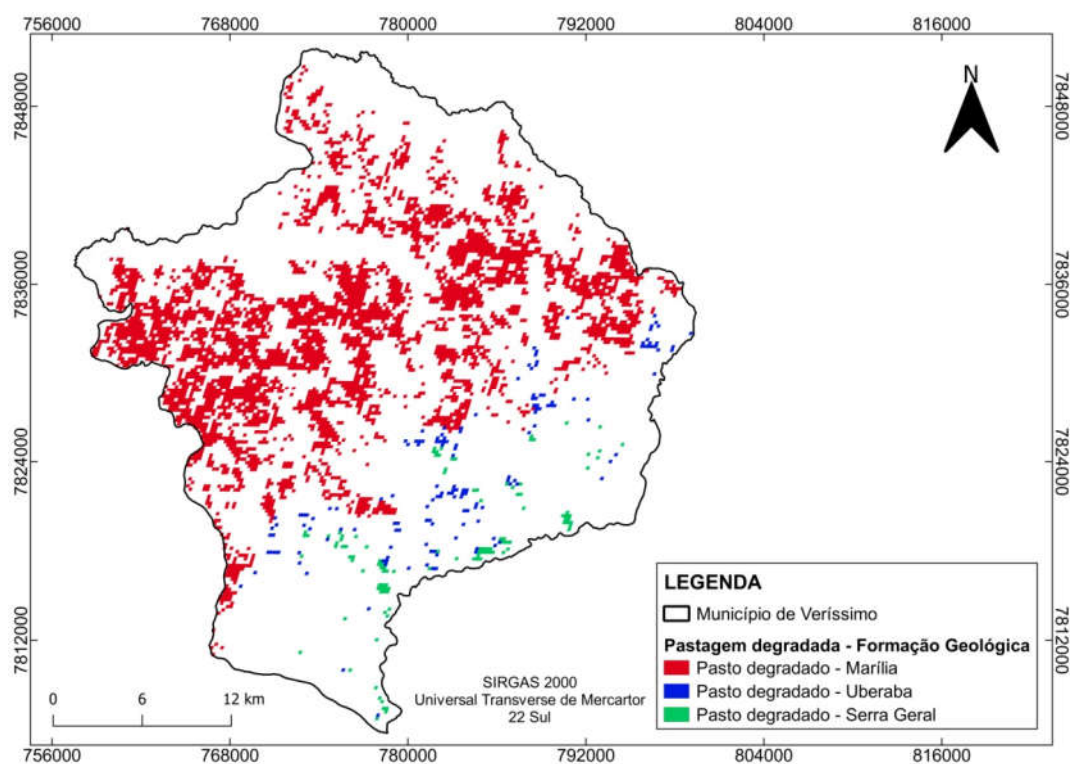


Figura 13: Mapa das pastagens degradadas para as formações Marília, Uberaba e Serra Geral no Município de Veríssimo-MG.

Fonte: acervo próprio

6 DISCUSSÃO

O monitoramento e mapeamento do nível de degradação de extensas áreas de vegetação por meio do sensoriamento remoto têm apresentando enorme potencial como demonstrado em vários estudos (HOPPING et al., 2018; NUMATA et al., 2007; TEPANOSYAN et al., 2017; TOMASELLA et al., 2018; ZHUMANOVA et al., 2018). No presente estudo, como método de diagnóstico utilizou-se séries temporais do MODIS-NDVI, com aplicação de abordagem metodológica aprimorada posposta por Valle Júnior et al., 2019. Os achados apontam que o método é eficiente na determinação do padrão do NDVI e do nível de degradação das áreas de pastagens, para as distintas formações geológicas localizadas no município de Veríssimo-MG (Formação Uberaba, Marília e Serra Geral).

Nesta perspectiva, o método apresenta enorme potencial da aplicação no monitoramento e fiscalização de área de pastagens degradadas, em vista a estabelecer novas estratégias de manejo voltadas à prevenção e recuperação da qualidade do solo (CONGIO et al., 2018; JAKIMOW et al., 2018; MARQUES et al., 2016; ROCHA JUNIOR et al., 2017; TEIXEIRA et al., 2015), ao invés da invasão de novas áreas de vegetação nativa (CAVIGLIA-HARRIS, 2018; RUFIN et al., 2015).

É importante ressaltar que o crescimento desordenado e criminoso de extensas áreas de pastagens degradadas é um fenômeno presente tanto no Brasil (COSTA & REHMAN, 1999), como em outros países (KOSMAS et al., 2016). No presente estudo, a caracterização do nível de degradação das pastagens revelou declínios expressivos (por ordem de grandeza) da matéria orgânica (MO), carbono orgânico (CO) e pH, além macroporosidade do solo. A elevação da concentração de alumínio trocável (Al^{3+}), acidez potencial ($H+Al$) e da redução de macronutrientes do solo, como fósforo (P), caracteriza elevado processo de acidificação dos solos, com pH entre 4,5 - 5,0. A acidificação dos solos destas áreas de pastagens, apresenta provável relação com o processo de exportação e lixiviação de nutrientes, decorrentes da intensificação do ciclo da matéria orgânica e do próprio manejo da fertilidade do solo.

Alterações causadas na porosidade do solo, além de modificar nas taxas de trocas gasosas, alteram a disponibilidade de água para as plantas. Neste sentido, Silva, Libardi e Camargo (1986), em Latossolo Roxo textura argilosa e Latossolo Vermelho-Amarelo textura média, e Oliveira al. 2004, em Latossolo Vermelho

distrófico, constataram que o uso do solo em relação a uma condição natural, modifica a retenção de água, por alterar a distribuição de tamanho dos poros e os teores de matéria orgânica.

Quando ocorre a degradação da estrutura do solo, há modificações no arranjo de suas partículas, provocando diminuição no tamanho dos poros, especialmente daqueles com maior tamanho (macroporos), o que leva à redução na área da seção transversal para o fluxo de água, juntamente com percursos mais tortuosos para o movimento de fluido, afetando com isso o processo de infiltração (ALVES; SUZUKI; SUZUKI, 2007).

Os macroporos estão relacionados com processos vitais para as plantas, devendo ser preservados. A redução da macroporosidade tende a se refletir na porosidade total e no aumento de densidade de solo (SPERA et al., 2006). Considerando que as raízes da maioria das culturas podem crescer com macroporosidade acima de 10 % (KLEIN; LIBARDI, 2002) e que o conteúdo de água armazenada deve ser maior que o de ar, o solo ideal é aquele que apresenta proporção de macro:microporos de 1:2, garantindo suficiente aeração, permeabilidade e armazenamento de água.

Nas áreas de pastagens avaliadas no presente estudo, observa-se maior proporção de microporos em relação aos macroporos, com média geral da proporção de macro:microporos de 1:8 na formação Uberaba, 1:4 na formação Marília e 1:11 na formação Serra Geral. Esta alteração possivelmente apresenta relação com a diminuição da porosidade total e com o aumento de densidade do solo nas áreas avaliadas.

Moreira et al. (2005) estudaram duas áreas de pastagens, ambas com *Brachiaria brizantha*, uma denominada área recuperada e outra denominada área degradada. Porém, ambas degradadas, em Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa. As pastagens recuperadas apresentaram maior quantidade de macroporos no solo, a partir de 7,5 cm de profundidade, com o aumento desses ao longo do perfil até 30 cm profundidade. Na camada de solo até 7,5 cm, os valores de macroporosidade foram semelhantes nas duas áreas, indicando que esse atributo foi sensível à ação do pisoteio na superfície, independentemente da maior quantidade de matéria orgânica produzida e da maior colonização do perfil do solo pelo sistema radicular da forrageira.

Assim, de acordo com as alterações da porosidade, pode-se inferir aumento da densidade do solo acima do limite crítico, decorrente do processo de compactação, com redução da macroporosidade e da porosidade total, com consequente modificação da capacidade de retenção de água (ALVES; SUZUKI; SUZUKI, 2007, MOREIRA et al., 2005, SPERA et al., 2006).

A retenção de água no solo é considerada uma avaliação adequada para estimar sua qualidade física e estrutural (MARCHÃO et al., 2007). A retenção de água do solo é característica específica de cada solo, sendo resultado de ação conjunta e complexa de vários fatores, como o teor e mineralogia da fração argila (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999), teor de matéria orgânica, estrutura e densidade do solo (BEUTLER et al., 2001).

Os solos com maior teor de argila apresentam maior permeabilidade, possuindo maior capacidade de retenção de água (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999). Assim sendo, Latossolos caulíníticos apresentaram maior densidade do solo, menor estabilidade de agregados em água, menor macroporosidade e menor permeabilidade quando comparados com Latossolos gibsíticos.

Os atributos físicos dos solos das áreas de pastagens avaliadas apresentaram grande variabilidade, mesmo dentro de uma mesma fisionomia de pastagem. Este fato está relacionado à distinta característica do relevo e da formação geológica do município de Veríssimo-MG, implicando na presença de diversos tipos de solos e em diferentes níveis de degradação, com observado nas formações Uberaba, Marília e Serra Geral.

Não obstante, o progressivo avanço do processo de degradação das áreas de pastagens, como no município de Veríssimo-MG, apresenta como única solução a sua restauração. A restauração de solos de pastagem degradados requer a recuperação da estrutura do solo por meio de atividade biológica aprimorada, sendo necessária a substituição das tradicionais gramíneas por plantas forrageiras melhoradas ou componentes da cultura, que estimulem mecanismos específicos de mobilização de fósforo, para trazer o fósforo recalcitrante de volta ao ciclo.

Entretanto, há uma dificuldade e resistência dos órgãos ambientais competentes na determinação da classificação da degradação do solo como dano ambiental. Assim, é imprescindível o desenvolvimento e validação de novos métodos precisos de diagnósticos e mapeamento de áreas de pastagens degradadas, como a abordagem aprimorada proposta por Valle Júnior et al., 2019.

A abordagem aprimorada em questão foi capaz de diagnosticar e mapear com precisão as áreas pastagens degradadas no município de Veríssimo-MG, apresentando adequada resolução espacial para ser utilizada como ferramenta pedagógica ou coercitiva.

Esta afirmação esta fundamentada no fato que as abordagens pedagógicas são as mais prováveis de sucesso a longo prazo, pela ação de conscientização dos agricultores, em vista à recuperação das pastagens degradadas e a redução do impacto ambiental, além do aumento da produção na pecuária. Assim, o objetivo é produzir mais e melhor, para intensificar a produção agrícola sustentável, adotando como principal estratégia a substituição de tradicionais gramíneas por plantas forrageiras melhoradas. Neste contexto, ocorre aumento do sequestro de carbono do solo, intensificando a produção, sem a necessidade de ampliação das áreas de desmatamento (SILVA et al., 2017).

Não obstante, a implementação de sistemas agroflorestais, possibilita melhora do manejo e da qualidade da dieta de ruminantes, resultando em aumento da produção de carne e de leite (ROCHA et al., 2016; THORNTON & HERRERO, 2010). Dentre as estratégias, o uso de vegetação nativa ou a associação de culturas, possibilita a conversão em sistema silvipastoril (PIGNATARO ET al., 2017) ou reflorestamento (CARPENTER et al., 2004).

Contudo, espera-se que o estudo contribua para conscientização dos produtores rurais, órgãos ambientais e governantes, para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de novos métodos de diagnóstico e mapeamento de pastagens degradadas, em vista a caracterização dos danos ambientais, para aplicação da lei e a adoção de medidas mitigadoras e compensatórias para prevenção e reparação dos impactos ambientais.

7 CONCLUSÕES

O método de abordagem de sensoriamento aprimorado, baseada em imagens de NDVI, mostrou-se eficiente no diagnóstico e mapeamento de aproximadamente 387 km² de áreas de pastagens, na Bacia do Rio Uberaba, Veríssimo (Estado de Minas Gerais, Brasil), sendo 162,1 km² de pastos sadios e 224,9 km² de pastos degradados. A caracterização do nível de degradação das pastagens revelou expressivo declínio da matéria e carbono orgânica e do pH, com aumento da concentração de alumínio trocável e da acidez potencial. Em decorrência, foi evidenciada redução de macronutrientes e da macroporosidade, comprometendo a adequada aeração, permeabilidade e armazenamento de água dos solos das áreas com presença de degradação, nas formações Marília (210,5 km²), Serra Geral (6,05 km²) e Uberaba (8,4 km²). Os achados são fortes o suficiente para servir como alerta a população e às autoridades ambientais sobre a importância do controle e mitigação, em vista a prevenção e recuperação da qualidade dos solos das áreas de pastagem, em especial no bioma Cerrado.

8 REFERÊNCIAS

- AGUIAR, M. I. **Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais**. 2008. 79 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
- ALMEIDA, A. M.; VALLE JÚNIOR, R. F. Diagnóstico da expansão agropecuária na bacia do rio Uberaba, Veríssimo – MG, utilizando-se do sistema de informação geográfica. **Caminhos de Geografia**, v. 14, n. 46, p. 168–180, 2013.
- ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A.; SUZUKI, L. E. A. S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho Distrófico em recuperação. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, MG, v.31, n. 4, p. 617-625, 2007.
- ARAÚJO, E.A.; KER, J.C.; NEVES, J. C. L.; LANI, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v.5, n.1, p.187-206, 2012.
- ARSHAD, M.A.; LOWER, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: J.W.; JONES, A.J. (Eds.). **Methods for assessing soil quality**. Soil Science Society of America, p.123- 141, 1996. (Special publication, 49).
- BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **R. Bras. Ci. Solo**, 21:105-112. 1997.
- BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M.; PEREIRA FILHO, F. A.; CRUZ, J. C. Agregação de Latossolo Vermelho Distrófico Típico relacionada com o manejo na região dos Cerrados no Estado de MG. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, MG, v.25, n. 1, p. 129-136, 2001.
- BRITO, J.L.S., ROSA, R., FERREIRA, V.O. **Métricas de correlação entre dados de parcelas experimentais de campo e dados de imagens de satélite em áreas ocupadas com pastagens cultivadas no Triângulo Mineiro**. Technical Report, FAPEMIG2017_APQ-01542. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, Brasil, pp. 45, 2017.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 94p. 1986. (Boletim Técnico nº 106)
- CARPENTER, F.L., NICHOLS, J.D., SANDI, E. Early growth of native and exotic trees planted on degraded tropical pasture. **For. Ecol. Manag.** v.196, n. 2-3, p. 367–378, 2004.
- CARTER, M.R. **Organic matter and sustainability**. In: REES, R.M.; BALL, B.C.; CAMPBELL, C.D.; WATSON, C.A. (Ed.). Sustainable management of soil organic matter. New York: CABI Publishing, p.9-22. 2001.
- CAVIGLIA-HARRIS, J.L. Agricultural innovation and climate change policy in the Brazilian Amazon: intensification practices and the derived demand for pasture. **J. Environ. Econ. Manag.** v 90, n. 1, p. 232–248, 2018.
- CHAER, G. M. **Modelo para determinação de índice de qualidade do solo baseado em indicadores físicos, químicos e microbiológicos**. 2001. 90f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

- COLWELL, J. E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 3, n. 3, p. 175–183, 1974.
- CONGIO, G.F.S., BATALHA, C.D.A., CHIAVEGATO, M.B., BERNDT, A., OLIVEIRA, P.P.A., FRIGHETTO, R.T.S., MAXWELL, T.M.R., GREGORINI, P., DA SILVA, S.C. Strategic grazing management towards sustainable intensification at tropical pasture-based dairy systems. **Sci. Total Environ.** v. 636, p.872–880, 2018.
- COSTA, F.P., REHMAN, T. Exploring the link between farmers' objectives and the phenomenon of pasture degradation in the beef production systems of Central Brazil. **Agric. Syst.**, 61, 135–146, 1999.
- CRUZ, L.B.S. **Diagnóstico ambiental da bacia hidrográfica do rio Uberaba - MG**. Ph.D. thesis in Agriculture Engineering. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, pp. 182., 2003.
- CURRAN, P. J.; WARDLEY, N. W. Radiometric leaf area index. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 9, n. 2, p. 259–274, 1988.
- DIAS FILHO, M.B. **Pastagens cultivadas na Amazônia oriental brasileira: processos e causas de degradação e estratégias de recuperação**. In: Dias, L.E., Mello, J.W.V. (Eds.), **Recuperação de áreas degradadas**. UFV-DPS/Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, Viçosa, pp. 135–149, 1998.
- DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BZEDICEK, D. F. e STEWART, B. A., eds. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America 1994. p.3-21. (Special Publication, 35).
- ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 9-16, 2000.
- EMBRAPA - A EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. GALINARI, G. **Embrapa mapeia degradação das pastagens do Cerrado**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2361250/embrapa-mapeia-degradacao-das-pastagens-do-cerrado>. 2014.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ª. ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 212 p, 1997.
- FAO. Grassland Index. **A Searchable Catalogue of Grass and Forage Legumes**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 2009.
- FEARNSIDE, P. M. **Amazonia and global warming: Annual balance of greenhouse gas emissions from land-use change in Brazil's Amazon region**. p. 606-617 In: J. Levine (ed.) **Biomass Burning and Global Change. Volume 2: Biomass Burning in South America, Southeast Asia and Temperate and Boreal Ecosystems and the Oil Fires of Kuwait**. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, E.U.A. 902 p. 1996.
- FELLER, C.; BEARE, M.H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v.79, n.1, p.69-116, 1997.

- FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolo da região sudeste do Brasil. **Rev. Bras. Ciênc. do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, p. 513-524, 1999.
- FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2002, 97 p.
- FORMAGGIO, A. R. **Comportamento espectral de alvos - solos**. Material do Curso de Comportamento Espectral de Alvos. XIII Curso Internacional de Sensoriamento Remoto INPE – DSM. São José dos Campos – SP. 1999, 21 p.
- GATES, D.M.; KEEGAN, H. J.; SCHLETER, J.C.; WEIDNER, V.R. Spectral properties of plants **Appl. Opt.** v. 4, p.11. 1965.
- GOEL, N. S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**, New York, v. 4, n. 1, p. 1-212, 1988.
- HOPPING, K.A., YEH, E.T., GAERRANG, HARRIS, R.B. Linking people, pixels, and pastures: a multi-method, interdisciplinary investigation of how rangeland management affects vegetation on the Tibetan Plateau. **Appl. Geogr.** v.94, p. 147–162, 2018.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. RENAUX, P.; BELLO, L. **Rebanho de bovinos tem maior expansão da série histórica**. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/16994-rebanho-de-bovinos-tem-maior-expansao-da-serie-historica>. 2017.
- JAKIMOW, B., GRIFFITHS, P., VAN DER LINDEN, S., HOSTERT, P. Mapping pasture management in the Brazilian Amazon from dense Landsat time series. **Remote Sens. Environ.** v. 205, p. 453–468. 2018.
- JUSTICE, C. O., GIGLIO, L., KORONTZI, S., OWENS, J., ALLEAUME, S., MORISETTE, J. T., ROY, D. P., PETITECOLIN, F., DESCLOITRES, J., & KAUFMAN, Y. Global fire products from MODIS. **Remote Sensing of Environment**, 83, 245– 263, 2002.
- KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; CLINE,R.G.; HARRIS, R.F.; SCHUMAN, G.E. Soil quality: Aconcept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.1, p.4- 10, 1997.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Rev. Bras. Ciência Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 4, p. 857-867, 2002.
- KOSMAS, C., KARAMESOUTI, M., KOUNALAKI, K., DETSIS, V., VASSILIOU, P., SALVATI, L. Land degradation and long-term changes in agro-pastoral systems: an empirical analysis of ecological resilience in Asteroussia - Crete (Greece). **Catena**, v.147, p. 196–204, 2016.
- KUMAR, R. **Radiation from plants, reflection and emission: a review**. Lafayette, Purdue Research Foundation. (Research Project n. 5543), 88 p., 1972.
- KWON, H.-Y., NKONYA, E., JOHNSON, T., GRAW, V., KATO, E., KIHU, E. **Global Estimates of the Impacts of Grassland Degradation on Livestock Productivity from 2001 to 2011**. In: Nkonya, E., Mirzabaev, A., Von Braun, J. (Eds.), *Economics of Land Degradation and Improvement – A Global Assessment for Sustainable Development*. Springer Open. (Chapter 8). 2016. p. 197–214.

- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 2. ed. New York: John Wiley, 721 p., 1987.
- MACEDO, M. C. M.; EUCLIDES, V. P. B.; OLIVEIRA, M. P. Seasonal changes in the chemical composition of cultivated tropical grasses in the savanas of Brazil. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 17., 1993, Palmerston North. **Proceedings...** Palmerston North: New Zealand Grassland Association, 1993. v. 3, p. 2000-2002.
- MARCHÃO, R. L.; BALBINO, L. C.; SILVA, E. M.; JUNIOR, J. D. G. S.; SÁ, M. A. C.; VILELA, L. BECQUER, T. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 6, p. 873-882, 2007.
- MARQUES, A.R., VIANNA, C.R., MONTEIRO, M.L., PIRES, B.O.S., URASHIMA, D.C., PONTES, P.P. Utilizing coir geotextile with grass and legume on soil of Cerrado, Brazil: an alternative strategy in improving the input of nutrients in degraded pasture soil? *Appl. Soil Ecol.* v. 107, p. 290–297, 2016.
- MARTINAZZO, R. **Diagnóstico da fertilidade de solos em áreas sob plantio direto consolidado**. 2006. 84 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.
- MARTÍNEZ, L.J. & ZINCK, J.A. Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. **Soil Till. Res.** v. 75, p. 3-17, 2004.
- MAZZOCATO, M. E. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento urbano da bacia do rio Una**: município de São Sebastião, SP. 197 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1998.
- DIAS, L. E.; MELLO, J. W. V. **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa: UFV/Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, p.135-147. 1998.
- MIELNICZUK, J. **Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas**. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo. Ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre, Genesis, p.1-8. 1999.
- MOREIRA, J. A. A.; OLIVEIRA, I. P.; GUIMARÃES, C. B.; STONE, L. F. Atributos químicos e físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico sob pastagens recuperadas e degradadas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiás, v.35, n. 3, p. 155-161. 2005.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. São José dos Campos: Editora Com Deus, 2001. 250 p.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. São José dos Campos: Editora Com Deus, 2001. 250 p.
- NISHIYAMA, L. **Procedimentos de mapeamento geotécnico como base para análises e avaliações ambientais do meio físico, em escala 1:100.000: aplicação no município de Uberlândia - MG**. PhD Thesis in Geotechnical. Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 1998.
- NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 1989. 308 p.

- NUMATA, I., ROBERTS, D.A., CHADWICK, O.A., SCHIMEL, J., SAMPAIO, F.R., LEONIDAS, F.C., SOARES, J.V. Characterization of pasture biophysical properties and the impact of grazing intensity using remotely sensed data. **Remote Sens. Environ.** v. 109, p. 314–327, 2007.
- OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURI, N. Caracterização química e física – hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, Viçosa, MG, v.28, n. 2, p. 327-336, 2004.
- PALADINI, F.L.S. & MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um solo Podzólico Vermelho-Escuro afetado por sistema de culturas. **R. Bras. Ciênc. Solo**, 15:135-140, 1991.
- PIGNATARO, A.G., LEVY-TACHER, S.I., AGUIRRE-RIVERA, J.R., NAHED-TORAL, J., GONZÁLEZESPINOSA, M., GONZÁLEZ-ARZAC, A., BIGANZOLI, F., Natural regeneration of tree species in pastures on peasant land in Chiapas, Mexico. **Agric. Ecosyst. Environ.** v. 249, p. 137–143, 2017.
- PINTER, JR. P. J.; JACKSON, R. D.; EZRA, C. E.; GAUSMAN, H. W. Sun-angle and canopy – architecture effects on the spectral reflectance of six wheat cultivars. **International Journal of Remote Sensing**, London, 6 (12): 1813 – 1825, 1985.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Spectral properties of vegetation**. Material do Curso de Comportamento Espectral de Alvos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 15 p. 1991.
- RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- REICHARDT, R.; TIMM, L. C. **Solo Planta Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Manole. Barueri, São Paulo. 2012. p.524.
- ROCHA JUNIOR, P.R., ANDRADE, F.V., MENDONÇA, E.S., DONAGEMMA, G.K., FERNANDES, R.B.A., BHATTARAI, R., KALITA, P.K. Soil, water, and nutrient losses from management alternatives for degraded pasture in Brazilian Atlantic rainforest biome. **Sci. Total Environ.** v. 583, p. 53–63, 2017.
- ROCHA, G.P.E., VIEIRA, D.L.M., SIMON, M.F. Fast natural regeneration in abandoned pastures in southern Amazonia. **For. Ecol. Manag.**, 370, 93–101. 2016.
- RODRÍGUEZ, A. C. M. & MARTINS, E. R. C. Geração de Curvas de Nível a partir de Grades de MNT Provenientes de Dados do Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM), Utilizando o Software SPRING no Município de São Sebastião – SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 11º, 2005, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Imagem Multimídia. Seção de Comunicação Técnicas-Científicas, 2005. p. 2386-2393. (ISBN 85-904082-9-9).
- RODRÍGUEZ, A. C. M. **Mapeamento multitemporal do uso e cobertura do solo do município de São Sebastião-SP, utilizando técnica de segmentação e classificação de imagens TM-Landsat e HRV-SPOT**. 94 f. Publicação Didática (Especialização em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos, 2000.
- RONQUIM, C. C.; GONÇALVES, J. M. C.; GUILARDI, V.; GARÇON, E. A. M.; AGUIAR, D. A. **Dinâmica de uso e cobertura da terra em áreas de produção de café e cana-de-açúcar em municípios paulistas das bacias dos rios Mogi-Guaçu e Pardo entre 1988 e 2015**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 28 p. 2015.

- RUDORFF, C.M.; RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T.; SUGAWARA, L.M.; VIEIRA, C.A.O. Superfícies de resposta espectro-temporal de imagens do sensor MODIS para classificação de área de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v.37, p.118-125, 2007.
- RUFIN, P., MÜLLER, H., PFLUGMACHER, D., HOSTERT, P. Land use intensity trajectories on Amazonian pastures derived from Landsat time series. **Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.** v. 41, p. 1–10, 2015.
- RYAN, S., CROSS, P., WINNIE JR, J., HAY, C., BOWERS, J., GETZ, W. **The Utility of normalized difference vegetation index for predicting African Buffalo forage quality.** **J. Wildl. Manag.** v. 76, n. 7, 2012.
- SALICHTCHEV, K. A. **Algumas reflexões sobre o objeto e método da Cartografia depois da Sexta Conferencia Cartográfica Internacional.** Tradução. Seleções de textos, (18); 17-24, 1988.
- SANTANA, D.P.; BAHIA FILHO, A.F.C. **Soil quality and agricultural sustainability in the Brazilian Cerrado.** In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 16. 1998, Montpellier. Montpellier: ISSS, 1998.
- SANTOS, V. B. **Atributos de solos sob cultivo de frutíferas em sistemas de manejo convencional, em transição e orgânico no norte do estado do Piauí.** 2010. 120f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Jaboticabal. 2010.
- SANTOS, V. O.; FERREIRA, V. O. Efeito das mudanças no uso e ocupação do solo na disponibilidade hídrica de sub-bacias hidrográficas representativas da Mesorregião Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, Estado de Minas Gerais. **Horizonte Científico - Geografia.** v. 8, nº1, p. 1-19, 2014.
- SEYBOLD, C. A.; HERRICK, J. E.; BREJDA, J. J. Soil resilienc: a fundamental component of soil quality. **Soil Science**, Baltimore, v. 164, n.4, p. 224-234, 1997.
- SHORT, N. M. **Tutorial Vegetation Applications – Agriculture Forestry and Ecology.** RST, section 3. <[http:// fas.org/irp/imint/docs/rst/Sect3/Sect3_1.html](http://fas.org/irp/imint/docs/rst/Sect3/Sect3_1.html) > Acesso: Ago 2015.
- SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; CAMARGO, O. A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, MG, Viçosa, MG, v. 10, n. 1, p. 91-95, 1986.
- SILVA, L. G.; MENDES, I. C.; REIS JUNIOR, F. B.; FERNANDES, M. F.; MELO, J. T.; KATO, E. Atributos físicos, químicos e biológicos de um Latossolo de cerrado em plantio de espécies florestais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.6, p.613-620, 2009.
- SILVA, R.O., BARIONI, L.G., HALL, J.A.J., MORETTI, A.C., VELOSO, R.F., ALEXANDER, P., CRESPOLINI, M., MORAN, D. Sustainable intensification of Brazilian livestock production through optimized pasture restoration. **Agric. Syst.**, 153, 201–211, 2017.
- SIMONETT, D. S. The development and principles of remote sensing. In: _____ **Manual of remote sensing.** Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry, 1983. v.1, p. 1-34.

- SIQUEIRA, H.E., PISSARRA, T.C.T., JUNIOR, VALLE, FERNANDES, R.F., L.F.S, F.A.L. A multi criteria analog model for assessing the vulnerability of rural catchments to road spills of hazardous substances. **Environ. Impact Assess. Rev.**, 64, 26–36, 2017.
- SOUZA, L. S.; SOUZA, L. D.; SOUZA, L. F. S. Indicadores físicos e químicos de qualidade do solo sob enfoque de produção vegetal: estudo de caso para citros em solos coesos de tabuleiros costeiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA DO SOLO, 29. 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: UNESP:SBCS, 2003, CD-ROM
- SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 3, p. 533-542, 2006
- STEINFELD H, GERBER P, WASSENAAR T, CASTEL V, ROSALES M, DE HAAN C. **Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2006.
- TEIXEIRA, R.F.M., PROENÇA, V., CRESPO, D., VALADA, T., DOMINGOS, T. A conceptual framework for the analysis of engineered biodiverse pastures. **Ecol. Eng.** v. 77, p. 85–97, 2015.
- TEPANOSYAN, G.H., ASMARYAN, SH.G., MURADYAN, V.S., SAGHATELYAN, A.K. Mapping man-induced soil degradation in Armenia's high mountain pastures through remote sensing methods: a case study. **Remote Sens. Appl.: Soc. Environ.** v. 8, p. 105–113, 2017.
- THORNTON, P.K., HERRERO, M. The potential for reduced methane and carbon dioxide emissions from livestock and pasture management in the tropics. **PNAS** **107**, 19667–19672, 2010.
- TOMASELLA, J., VIEIRA, R.M.S.P., BARBOSA, A.A., RODRIGUEZ, D.A., SANTANA, M.O., SESTINI, M.F. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016. **Int J. Appl. Earth Obs. Geoinf.** v. 73, p. 197–206, 2018.
- TOWNSEND, C., COSTA, N., PEREIRA, R. **Recuperação e práticas sustentáveis de manejo de pastagens na Amazônia**. Documentos Embrapa 148. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/999525/1/doc148pastagens.pdf>. 2012.
- TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sens. Environ.** v. 8, p. 127–150, 1979.
- VALLE JÚNIOR, R. F.; SIQUEIRA, H. E.; VALERA, C. A.; OLIVEIRA, C. F.; FERNANDES, L. F. S.; MOURA, J. P.; PACHECO, F. A. L. Diagnosis of degraded pastures using an improved NDVI-based remote sensing approach: An application to the Environmental Protection Area of Uberaba River Basin (Minas Gerais, Brazil). **Remote Sens. Appl.: Soc. Environ.** v. 14, p. 20-33, 2019.
- VERMOTE, E. F.; EL SALEOUS, N. Z.; JUSTICE, C. O. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. **Remote Sensing of Environment**, v.83, n.1-2, p. 97- 111, 2002.
- VIEIRA, J. M.; KICHEL, A. N. **Estabelecimento e recuperação de pastagens de Panicum maximum**. In: PEIXOTO, A.M. (Ed.), Simpósio sobre Manejo da Pastagem 12. FEALQ, Piracicaba, p. 147–196, 1995.
- YEOMANS, J.C., BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Commun. Soil Sci. Plant. Anal.**, 19:1467-1476, 1988.

ZHUMANOVA, M., MÖNNIG, C., HERGARTEN, C., DARR, D., WRAGE-MÖNNIG, N. Assessment of vegetation degradation in mountainous pastures of the Western TienShan, Kyrgyzstan, using e MODIS NDVI. **Ecol. Indic.** V. 95, P. 527–543, 2018.