

CAPÍTULO 3

SENSORIAMENTO REMOTO E ÍNDICES DE VEGETAÇÃO: CONCEITOS E APLICAÇÕES - REVISÃO DE LITERATURA

Data de aceite: 03/06/2024

Leonardo França da Silva

Universidade de Federal da Grande
Dourados
Dourados – Mato Grosso do Sul (Brasil)
<https://orcid.org/0000-0002-9710-8100>

Érika Manuela Gonçalves Lopes

Universidade Federal de Minas Gerais
Montes Claros - MG
<https://orcid.org/0000-0002-7518-8955?lang=pt>

Sarah Fernanda de Almeida Martins

Universidade Federal de Viçosa
Viçosa - Minas Gerais
<https://orcid.org/0009-0008-6865-5827>

Fernanda Lamede Ferreira de Jesus

Universidade Federal da Grande
Dourados
Dourados – Mato Grosso do Sul (Brasil)
<https://orcid.org/0000-0002-9183-6326>

Marcos Antônio Pereira da Fonseca Maltez

Universidade Federal Rio Grande do Sul
Porto Alegre – Rio Grande do Sul
<https://orcid.org/0000-0003-0941-8051>

Cássio Furtado Lima

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Pará - IFPA
<https://orcid.org/0000-0001-5461-1809>
<http://lattes.cnpq.br/4218769196783818>

Matheus Mendes Reis

Instituto Federal do Norte de Minas Gerais
(IFNMG)
Januária - Minas Gerais (Brasil)
<https://orcid.org/0000-0003-2100-2438>

Rafaella Resende Andrade

Universidade de Florença
Florença – Toscana (Itália)
<https://orcid.org/0000-0003-3182-0741>

Fabiane de Fátima Maciel

Universidade de Federal Viçosa
Viçosa – Minas Gerais (Brasil)
<https://orcid.org/0000-0002-7117-6965>

Laura Thebit de Almeida

Instituto Federal do Norte de Minas Gerais
Januária - Minas Gerais
<https://orcid.org/0000-0002-4501-134X>

Irene Menegali

Universidade Federal de Minas Gerais
<https://orcid.org/0000-0001-5323-4693>

Ariadna Faria Vieira

Universidade Estadual do Piauí
Uruçuí- Piauí (Brasil)
<https://orcid.org/0000-0002-1185-4269>

Silvana Ferreira Bicalho

Universidade Estadual do Sudoeste da
Bahia
Vitória da Conquista - Bahia (Brasil)
<https://orcid.org/0000-0002-5502-6430>

RESUMO: A definição de sensoriamento remoto é claramente especificada ao afirmar que a captura de imagens de um objeto é realizada pelo sensor através de medições da radiação eletromagnética, como a luz solar refletida da superfície de qualquer objeto. Somente sensores que obtenham imagens por meio da detecção direta da radiação eletromagnética devem ser categorizados como sensoriamento remoto. Nos últimos quatro decênios, o planeta Terra tem sido objeto de observação e análise por meio de sensores de imagem, os quais registram uma ampla gama de fenômenos presentes em sua superfície, incluindo quaisquer mudanças que possam ocorrer. Essa abordagem visa principalmente adquirir imagens periódicas para monitorar o meio ambiente em escala global, com o intuito de fornecer informações mais precisas sobre os recursos naturais, sejam eles renováveis ou não. Com base no exposto, o objetivo desta revisão de literatura é elucidar os aspectos históricos do sensoriamento remoto, destacando seus princípios, conceitos e aplicações em diversas áreas científicas e correlatas. Além disso, será abordada a caracterização dos sensores empregados no processo de captura de imagens. Por meio desta revisão de literatura, constatou-se que o sensoriamento remoto é fundamental para o monitoramento e o estudo de diversos aspectos da Terra, incluindo vegetação, cobertura do solo, uso da terra e mudanças ambientais ao longo do tempo. Seu histórico revela uma evolução constante em termos de tecnologia e aplicações. Dessa forma, compreender os princípios e conceitos do sensoriamento remoto é a base para realizar a exploração dos dados e transformá-los em informações úteis e influentes para tomadas de decisão. Neste contexto, os índices de vegetação são ferramentas essenciais para extração de dados de áreas vegetadas, permitindo avaliar a saúde, a densidade e a distribuição da vegetação em diferentes ambientes, possibilitando adquirir e analisar dados que sem o uso dos índices de vegetação não seria possível.

PALAVRAS-CHAVE: Processamento de imagens, sensores, ondas eletromagnéticas, NDVI.

REMOTE SENSING AND VEGETATION INDICES: CONCEPTS AND APPLICATIONS - LITERATURE REVIEW

ABSTRACT: The definition of remote sensing is clearly specified by stating that capturing images of an object is performed by the sensor through measurements of electromagnetic radiation such as sunlight reflected from the surface of any object. Only sensors that obtain images through direct detection of electromagnetic radiation should be categorized as remote sensing. Over the last four decades, planet Earth has been the object of observation and analysis using image sensors, which record a wide range of phenomena present on its surface, including any changes that may occur. This approach mainly aims to acquire periodic images to monitor the environment on a global scale, with the aim of providing more accurate information about natural resources, whether renewable or not. Based on the above, the objective of this literature review is to elucidate the historical aspects of remote sensing, highlighting its principles, concepts and applications in various scientific and related areas. Furthermore, the characterization of the sensors used in the image capture process will be addressed. Through this literature review, it was found that remote sensing is fundamental for monitoring and studying various aspects of the Earth, including vegetation, land cover, land use and environmental changes over time. Its history reveals constant evolution in terms of technology and applications. Therefore, understanding the principles and concepts of remote

sensing is the basis for exploring data and transforming it into useful and influential information for decision-making. In this context, vegetation indices are essential tools for extracting data from vegetated areas, allowing to evaluate the health, density and distribution of vegetation in different environments, making it possible to acquire and analyze data that would not be possible without the use of vegetation indices.

KEYWORDS: Image processing, sensors, electromagnetic waves, NDVI.

INTRODUÇÃO

Os recursos naturais e o meio ambiente terrestre passam por mudanças constantes, resultantes tanto da evolução natural quanto das atividades humanas. Compreender a complexa interação dos fenômenos que desencadeiam essas mudanças requer observações em uma ampla gama de escalas temporais e espaciais. A observação da Terra por meio de satélites emerge como a abordagem mais eficaz e econômica para coletar os dados necessários para monitorar e modelar esses fenômenos, especialmente em países de vasta extensão territorial, como o Brasil (Ferreira et al., 2011; Reis et al., 2017; Sano et al., 2019; Dong et al., 2021).

A utilização de softwares especializados para o processamento de imagens permite a geração de produtos com diversas características, como diferentes composições de cores, ampliações de áreas específicas e classificações temáticas dos objetos identificados nas imagens. Isso resulta na produção de mapas temáticos que são fundamentais para estudos em diversas áreas, incluindo geologia, vegetação, uso do solo, relevo, agricultura, rede de drenagem, inundações, entre outros (Mito, 2016; Neves et al., 2020; Jiang et al., 2022).

Neste contexto, ao longo das últimas quatro décadas, o planeta Terra tem sido alvo de observação e análise por meio de sensores de imagem, os quais registram uma ampla gama de fenômenos presentes em sua superfície, incluindo quaisquer mudanças que possam ocorrer. Essa abordagem visa principalmente adquirir imagens periódicas para monitorar o meio ambiente em escala global, com o intuito de fornecer informações mais precisas sobre os recursos naturais, sejam eles renováveis ou não.

Independentemente do propósito das imagens, é essencial compreender como ler e processar os dados digitais das mesmas. O acesso generalizado a computadores, aliado ao desenvolvimento de programas de fácil utilização e interfaces gráficas amigáveis, tornou essa tarefa significativamente mais acessível do que era quando as primeiras imagens de satélite só podiam ser interpretadas por especialistas em computação, utilizando computadores que ocupavam o espaço de uma sala inteira. Atualmente, os programas disponíveis para processamento de imagens de sensoriamento remoto não exigem habilidades avançadas em computação por parte dos usuários. O que se tornou mais relevante é o entendimento da formulação matemática ou estatística dos algoritmos, dos diversos métodos de processamento de imagens e das transformações realizadas nelas, a

fim de extrair o máximo de informações possível, muitas vezes não perceptíveis à primeira vista (Mahaut et al., 2020; Scher et al., 2020).

Nesse contexto, as imagens provenientes de sensores remotos podem ser adquiridas por meio de uma diversidade de plataformas, incluindo satélites, aeronaves, veículos aéreos não tripulados (VANTs) e máquinas agrícolas autopropelidas. O sensoriamento remoto (SR) abrange uma série de aplicações, entre as quais se destacam: (a) a estimativa da biomassa e produtividade das culturas; (b) o monitoramento do estresse hídrico e vigor das plantas; e (c) a avaliação do estágio fenológico (Brandão, 2009; Herbest, 2019).

Uma das primeiras aplicações dos dados adquiridos remotamente é a detecção de variações na refletância, relacionadas à densidade da cobertura vegetal. A radiometria espectral constitui uma área de suma importância no contexto do sensoriamento remoto, podendo ser realizada mediante medidas efetuadas em laboratório ou em campo. Essa abordagem permite a identificação da intensidade com que diferentes materiais, como solos, rochas e vegetação, refletem a radiação eletromagnética em diversos comprimentos de onda do espectro (Brandão et al., 2008).

Assim, os dados de refletância têm sido correlacionados com características das plantas, como índice de área foliar, biomassa ou fração interceptada de radiação fotossinteticamente ativa. Na agricultura, as propriedades da refletância em cada faixa do espectro eletromagnético podem ser mais precisamente avaliadas por meio de combinações matemáticas de diferentes bandas espectrais (Atzberger, 2013). Tais transformações, medidas da atividade vegetal, empregam especialmente as faixas do visível e infravermelho próximo (NIR - Near Infrared) e são denominadas índices de vegetação (IVs). Para compreender a criação dos IVs, é necessário um entendimento mais aprofundado da resposta espectral da vegetação.

Com base no exposto, o propósito desta revisão de literatura é elucidar os aspectos históricos do sensoriamento remoto, destacando seus princípios, conceitos e aplicações em diversas áreas científicas e correlatas. Além disso, será abordada a caracterização dos sensores empregados no processo de captura de imagens.

REVISÃO DE LITERATURA

Histórico do sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto teve suas origens impulsionadas pelo avanço da exploração espacial, especialmente durante a corrida espacial na década de 60. Neste cenário, o desenvolvimento de foguetes lançadores permitiu o envio de satélites artificiais ao espaço para diversas finalidades, incluindo os satélites meteorológicos. Estes, inicialmente destinados à observação das condições atmosféricas, acabaram por ocasionar os primeiros passos do sensoriamento remoto ao revelar imagens da superfície terrestre (Meneses e Almeida, 2012).

O período também testemunhou o lançamento dos primeiros foguetes tripulados, como parte dos programas Mercury, Gemini e Apollo (Chuvieco e Huete, 2016). Estas missões não apenas proporcionaram as primeiras fotos da Terra do espaço, mas também introduziram experimentos de fotografia multiespectral, abrindo caminho para uma compreensão mais profunda das feições geológicas e ambientais do nosso planeta. Esses avanços foram basilares para o promissor futuro do sensoriamento remoto, destacando sua capacidade de coletar dados de maneira sistemática e abrangente (Meneses e Almeida, 2012; Chuvieco e Huete, 2016).

A combinação entre satélites artificiais e sensores imageadores marca um dos maiores benefícios do desenvolvimento tecnológico para o levantamento dos recursos naturais terrestres. Um marco significativo foi o lançamento do primeiro satélite de sensoriamento remoto, o Landsat 1, em 1972 (Meneses e Almeida, 2012). Esse satélite permitiu a obtenção simultânea de imagens em diferentes faixas espectrais. Desde então, diversos países desenvolveram programas de sensoriamento remoto, resultando em uma rede global de satélites orbitais que fornecem imagens em várias faixas espectrais e parâmetros de resolução, abrangendo desde sensores hiperespectrais até sensores de alta resolução espacial, possibilitando monitorar e analisar detalhadamente as mudanças na superfície terrestre em escala global (Meneses e Almeida, 2012).

Princípios e conceitos do sensoriamento remoto

Sensoriamento remoto (SR) é uma tecnologia capaz de captar imagens da superfície terrestre sem haver a necessidade do contato físico direto do sensor e objeto alvo. Neste sentido, existe uma definição científica que pode ser atribuída ao termo SR é “Ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres” (Meneses e Almeida, 2012; Chuvieco e Huete, 2016).

A definição de sensoriamento remoto é claramente especificada ao afirmar que a captura de imagens de um objeto é realizada pelo sensor por meio de medições da radiação eletromagnética, como a luz solar refletida da superfície de qualquer objeto. É estabelecido que apenas sensores que obtenham imagens por meio da detecção direta da radiação eletromagnética devem ser categorizados como sensoriamento remoto (Meneses e Almeida, 2012; Lillesand et al., 2015).

Com base na definição apresentada, é notório que o entendimento das interações entre a Radiação Eletromagnética (REM) e os diversos materiais (rochas, solos, vegetação, água, construções humanas etc.) é basilar para a interpretação dos dados coletados por diferentes sensores (Chuvieco e Huete, 2016).

A definição destacada enfatiza a importância de compreender as interações entre a Radiação Eletromagnética (REM) e os materiais (como rochas, solos, vegetação,

água, construções humanas, etc.) para interpretar os dados coletados por diferentes sensores. Sendo assim, entender a natureza da radiação eletromagnética começa com o reconhecimento de sua dualidade: ela é simultaneamente onda e energia (Lillesand et al., 2015; Chuvieco e Huete, 2016).

O entendimento da dualidade é fundamental para o Sensoriamento Remoto (SR), pois em qualquer análise de imagem, a coexistência da radiação eletromagnética tanto na forma de onda quanto na forma de energia deve ser considerada. Esse princípio é essencial para explicar todas as observações relacionadas às características dos objetos em estudo. (Lillesand et al., 2015; Chuvieco e Huete, 2016).

Diante desse fato, uma característica da REM utilizada profundamente na análise e na extração de informações das imagens provenientes do SR é o espectro eletromagnético. Este é uma representação gráfica que mostra a distribuição da radiação eletromagnética em diferentes regiões, organizadas de acordo com o comprimento de onda e a frequência (Lillesand et al., 2015), como é possível verificar na Figura 1.

Vale destacar que a radiação eletromagnética abrange uma gama de comprimentos de onda e frequências, desde ondas de rádio com baixa energia e longos comprimentos de onda até raios gama com alta energia e curtíssimos comprimentos de onda (Figura 1). Os comprimentos de onda e as diversas combinações entre eles podem ser utilizado para detecção e extração de informações de uma imagem de SR. Neste contexto trabalha-se com um conceito extremamente importante para o SR, que é a assinatura espectral (Lillesand et al., 2015).

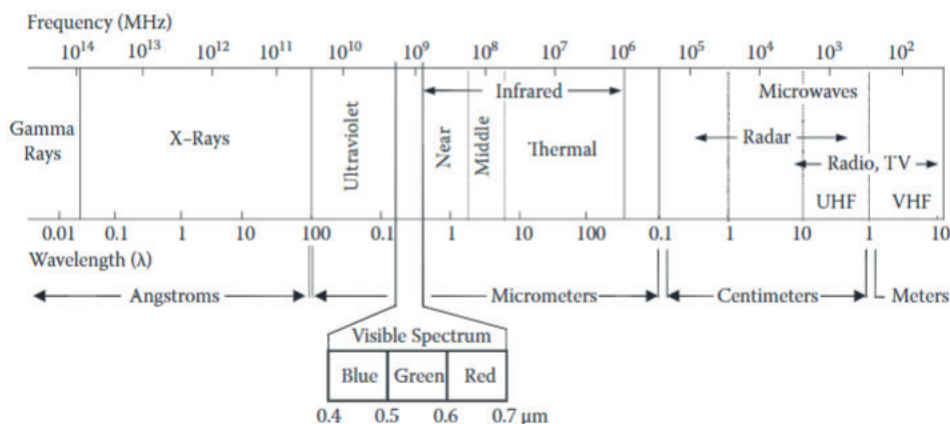


Figura 1. Espectro eletromagnético com destaque o espectro visível.

Fonte: Chuvieco e Huete (2016)

Viana (2020) enfatiza a importância da Assinatura Espectral, definida como a resposta dos objetos presentes na superfície terrestre à radiação eletromagnética (REM) incidente, a qual é intrinsecamente dependente da estrutura atômica e molecular desses alvos. É salientado que os objetos absorvem uma parte da energia radiante proveniente do sol e refletem outra parte, em determinadas faixas do espectro, conhecidas como bandas de absorção. A interação da radiação solar varia de acordo com a composição físico-química de cada alvo ou objeto, assim como suas características geomorfológicas.

Deste modo, a assinatura espectral é uma representação gráfica das variações na refletância de um material em diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético (Figura 2). Essa assinatura é utilizada para identificar e caracterizar diferentes tipos de materiais na superfície terrestre, tendo em vista que cada material possui uma assinatura espectral única devido às suas propriedades físicas, químicas e biológicas específicas (Chuvienco e Huete, 2016). Dessa forma a assinatura espectral pode ser utilizada para identificação de materiais, classificação de uso da terra, monitoramento ambiental, planejamento e gerenciamento agrícola, gerenciamento de desastres, dentre outras inúmeras possibilidades.

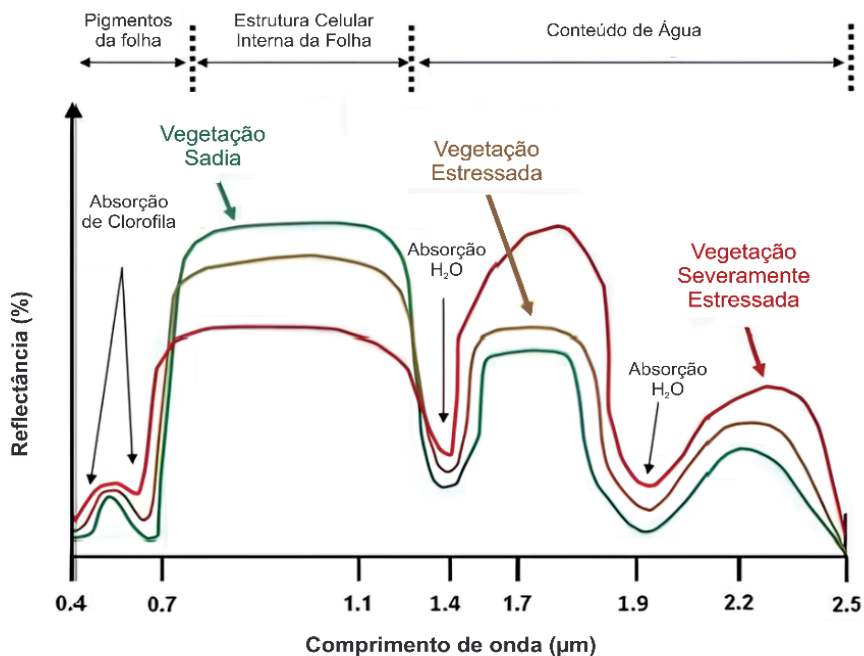


Figura 2. Assinatura espectral da folha sob diferentes graus de estresse

Fonte: SOUZA et al. (2008)

No SR, diferentes sensores são projetados para capturar informações em regiões específicas do espectro eletromagnético, permitindo a análise detalhada das características das feições terrestres. Por exemplo, sensores infravermelhos são sensíveis à temperatura e à vegetação, enquanto sensores ópticos capturam imagens com base na reflexão da luz visível (Chuvieco e Huete, 2016).

Características dos sensores aplicados no sensoriamento remoto

Os sensores remotos são dispositivos que captam a energia eletromagnética emitida por objetos, convertendo-a em sinais elétricos. Esses sinais são registrados e podem ser armazenados ou transmitidos em tempo real. Posteriormente, são convertidos em informações que descrevem as características dos objetos na superfície terrestre. Esses sensores podem ser instalados em plataformas terrestres (tratores), aéreas (como balões, helicópteros e aviões) ou orbitais (satélites artificiais) (Chuvieco e Huete, 2016).

Um sensor remoto apresenta diferentes características para realizar a aquisição de dados por meio da REM, dentre essas características pode-se citar a resolução espacial, espectral, radiométrica e temporal. A resolução espacial refere-se à capacidade do sensor em distinguir objetos na superfície terrestre. Ela depende do tipo de detector utilizado e da altura em que o sensor está posicionado em relação ao objeto observado (Meneses e Almeida, 2012).

Já a resolução espectral diz respeito à largura do intervalo espectral que o sensor opera. Quanto maior o número de bandas espectrais e mais estreitas as faixas de comprimento de onda, melhor será a capacidade do sensor em captar diferentes características espectrais dos materiais. A resolução radiométrica está relacionada com a capacidade do sensor em detectar pequenas variações na energia refletida ou emitida pelos elementos da cena. Uma maior capacidade de quantização resulta em uma melhor qualidade visual da imagem. Por fim, a resolução temporal refere-se à frequência com que o sensor pode adquirir informações sobre o objeto ao longo do tempo (Meneses e Almeida, 2012; Chuvieco e Huete, 2016).

Neste sentido, tais características dos sensores são fundamentais para diferentes aplicações (manejo e gerenciamento de culturas, gestão ambiental, planejamento urbano etc.). Uma vez que a qualidade do sensor utilizado influi na precisão dos dados e, consequentemente na tomada de decisão de pode ser gerada por meio destes (Chuvieco e Huete, 2016).

Índices de vegetação

Os índices de vegetação (IVs) são fórmulas matemáticas que usam a relação entre dois ou mais comprimentos de onda de luz refletida pelas plantas para destacar uma propriedade específica da vegetação. Eles são elaborados usando as propriedades de refletância da vegetação, assim cada um é calculado para acentuar propriedades particulares da vegetação (clorofila, biomassa, saúde etc.). Por isso, existem vários tipos de IVs, cada um com suas próprias vantagens e limitações (Lillesand et al., 2015; Chuvieco e Huete, 2016).

Vale destacar que o conceito de um índice de vegetação baseia-se nas maneiras distintas pelas quais a vegetação interage com a luz. Quando a luz solar atinge uma planta, certos comprimentos de onda são absorvidos pela fotossíntese, principalmente nas partes azul (em torno de 450 nm) e vermelha (em torno de 660 nm) do espectro. Por outro lado, a luz verde (em torno de 550 nm) e a luz infravermelha próxima (NIR, em torno de 800 nm) são refletidas. Essa resposta espectral característica é capturada na forma de IVs e com ela é possível realizar a elaboração de imagens com a feição vegetativa da área (Knipling, 1970; Lillesand et al., 2015).

Neste sentido, os IVs tornaram-se uma ferramenta indispensável na agricultura, fornecendo um meio quantitativo de avaliar e monitorar diversas características das plantas (Gitelson e Merzlyak, 1998; Chuvieco e Huete, 2016). Eles tradicionalmente são utilizados para monitorar a saúde das culturas, florestas e mudanças fenológicas, fornecendo informações para o gerenciamento de recursos agrícolas e florestais (Fensholt et al., 2009; Lillesand et al., 2015).

Dessa forma, pesquisas têm sido realizadas com diferentes IVs, cada um servindo a um propósito único e oferecendo diferentes vantagens dependendo do tipo de sensor e das condições de campo (Radocaj et al., 2023). Diante disso, para verificar quais são os IVs mais utilizados os autores Radocaj et al. (2023) avaliaram 4098 artigos científicos publicados na plataforma *Web of Science* considerando os temas “Agricultura de precisão” e “Índice de Vegetação”.

O trabalho desenvolvido revelou que no cenário da agricultura de precisão moderna mundial os IVs mais utilizados são [número de trabalhos sobre o tema, de acordo com os autores Radocaj et al. (2023); Porcentagem absoluta]: Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI - Normalized difference vegetation index) [2200; 53,7%], Índice de Vegetação Melhorado (EVI - Enhanced Vegetation Index) [459; 11,2%], Índice de Vegetação Normalizado pela Cor Verde (GNDVI - Green-normalized difference vegetation index) [329; 8,0%] e Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI - Soil-adjusted Vegetation Index) [225; 5,0%]. Dessa forma, nesta revisão serão abordados esses principais IVs.

Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI)

O NDVI é uma medida amplamente utilizada na avaliação da saúde e densidade da vegetação em diversas áreas, incluindo agricultura, silvicultura e ecologia. Ele é calculado a partir da diferença normalizada entre a refletância na banda do infravermelho próximo (NIR) e na banda do vermelho do espectro eletromagnético (Fernandez-Figueroa et al., 2022), conforme a Equação 1:

$$NDVI = \frac{(NIR - V)}{(NIR + V)} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde: NIR é a refletância na banda do infravermelho próximo; V é a refletância na banda do vermelho.

Os valores do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) variam de -1 a +1, sendo que valores mais altos indicam maior densidade e saúde da vegetação (Pettorelli et al., 2005). Este índice é útil para monitorar grandes áreas agrícolas e de copas de florestas, devido à sua sensibilidade ao conteúdo de clorofila, um indicador crucial da atividade fotossintética das plantas. No entanto, é importante ressaltar que o NDVI pode ser afetado pelo ruído do solo e atmosférico. Além disso, em áreas de alta biomassa, como florestas densas, o NDVI pode alcançar um limite de saturação, dificultando a percepção de diferenças na densidade vegetal e na saúde das plantas (Huete et al., 2002).

Além disso, o NDVI tem mostrado seu potencial para estabelecer metodologias de amostragem dentro do campo (Meyers et al., 2020), para o manejo de culturas (Vélez et al., 2019), para o zoneamento de acordo com o vigor da cultura (De Castro et al., 2018), para mapeamento de métricas fenológicas e para estimativa de rendimentos de grãos de trigo (Mirasi et al., 2021).

Índice de Vegetação Melhorado (EVI)

O EVI é uma medida semelhante ao NDVI, utilizada para avaliar a quantidade de vegetação verde. No entanto, o EVI apresenta vantagens sobre o NDVI ao corrigir algumas condições atmosféricas e o ruído de fundo da copa das árvores, tornando-se mais sensível em áreas com vegetação densa. Desenvolvido como um produto para os satélites Terra e Aqua MODIS, o EVI utiliza refletâncias corrigidas atmosféricamente para seu cálculo (Huete et al., 2002). Neste sentido, o cálculo do EVI (Equação 2) utiliza a refletância na banda do azul, que é para corrigir os efeitos dos aerossóis presentes na atmosfera.

$$EVI = 2,5 \frac{(NIR - V)}{(NIR + 6V - 7,5A + 1)} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde: NIR é a refletância na banda do infravermelho próximo; V é a refletância na banda do vermelho; A é a refletância na banda do azul.

Vale destacar que existem sensores que não captam a banda azul (A), como é o caso do AVHRR (Kim et al., 2014). Para esses casos os autores Jiang et al. (2008) desenvolveram o EVI2, que requer apenas duas bandas (NIR e V; Equação 3) para a determinação do índice e mesmo assim apresenta grande similaridade com o EVI. O EVI2 deve ser calculado sempre com os valores de refletância corrigido das alterações atmosféricas.

$$EVI2 = 2,5 \frac{(NIR - V)}{(NIR + 2,4V + 1)} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde: NIR é a refletância na banda do infravermelho próximo; V é a refletância na banda do vermelho

Índice de Vegetação Normalizado pela Cor Verde (GNDVI)

Ao substituir a faixa vermelha por verde na fórmula do NDVI, o GNDVI torna-se mais adequado em áreas com maior quantidade de solo exposto ou interferência atmosférica (Equação 4). O GNDVI é um índice que indica a atividade fotossintética da vegetação, sendo considerado como um índice de clorofila. Bausch et al. (2008) argumentam que a refletância em comprimentos de onda verde é mais responsiva às variações na clorofila das folhas e na saúde das plantas.

Neste sentido recomenda-se que o GNDVI seja utilizado nos estágios mais avançados de desenvolvimento de uma cultura (Gitelson e Merzlyak, 1998), pois satura mais tarde que o NDVI (adequado para estimar o vigor da cultura nos estágios iniciais). Além disso, o GNDVI é mais eficaz que o NDVI na detecção de mudanças na vegetação causadas por fatores ambientais, como estresse hídrico, doenças ou deficiências de nutrientes (Sankaran et al., 2015; Gerardo et al., 2022).

$$GNDVI = \frac{(NIR - Ve)}{(NIR + Ve)} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde: NIR é a refletância na banda do infravermelho próximo; Ve é a refletância na banda do verde.

Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI)

O SAVI é uma medida que busca minimizar os efeitos do solo de fundo nos sinais de vegetação em imagens de sensoriamento remoto, tornando sua aplicação útil em áreas com vegetação esparsa. Para realizar esta modificação, o SAVI incorpora um fator de ajuste do solo (L), na equação do NDVI (Equação 1), como é possível verificar na Equação 5. Neste sentido, o fator “L” varia de acordo com as características da refletância do solo, como calor e brilho, e depende da densidade da vegetação que se deseja analisar. Para baixa, média e alta densidade de vegetação, sugere-se o valor de L de 1,00, 0,50 e 0,25, respetivamente (Huete, 1988; Vélez et. al, 2023).

$$SAVI = \frac{(NIR - V)}{(NIR + V + L)} * (1 + L) \quad \text{Eq. 5}$$

Onde: NIR é a refletância na banda do infravermelho próximo; V é a refletância na banda do vermelho; L é fator de ajuste do solo.

Com base na Equação 5 é possível verificar que à medida que o valor do fator “L” é menor, mais o SAVI se aproxima do NDVI e quando esse valor for igual a zero o SAVI será igual a NDVI.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O SR hoje é fundamental para o monitoramento e o estudo de diversos aspectos da Terra, incluindo vegetação, cobertura do solo, uso da terra e mudanças ambientais ao longo do tempo. Seu histórico revela uma evolução constante em termos de tecnologia e aplicações. Dessa forma, compreender os princípios e conceitos do SR é a base para realizar a exploração dos dados e transformação destes em informações úteis e influentes para tomadas de decisão.

Neste contexto, os índices de vegetação são ferramentas essenciais para extração de dados de área vegetadas. Eles permitem avaliar a saúde, a densidade e a distribuição da vegetação em diferentes ambientes, possibilitando adquirir e analisar dados que sem o uso dos IVs não seria possível. Dentre os diferentes IVs, o NDVI é o mais amplamente utilizado, mas outros índices, como o EVI, GNDVI e SAVI, oferecem vantagens em certos contextos, como a capacidade de compensar o efeito do solo e a sensibilidade a diferentes tipos de vegetação. Dessa forma, a definição de qual IV utilizar deve passar pela análise das características do que será estudado (área vegetação, exposição de solo, exposição a diferentes materiais etc.) e de quais informações o estudo irá demandar (saúde da planta, danos por pragas, estresse hídrico etc.).

REFERÊNCIAS

Bausch, W.C., Halvorson, A. D., Cipra, J. Quickbird satellite and ground-based multispectral data correlations with agronomic parameters of irrigated maize grown in small plots. **Biosystems engineering**, v. 101, n. 3, p. 306-315, 2008.

De Castro, A. I., Six, J., Plant, R. E., Peña, J. M. Mapping crop calendar events and phenology-related metrics at the parcel level by object-based image analysis (OBIA) of MODIS-NDVI time-series: A case study in central California. **Remote Sensing**, v. 10, n. 11, p. 1745, 2018.

Dong, Y., Yin, Y., Li, X., Huang, J., Su, W..., & Wang, H. (2021). Spatial–Temporal Evolution of Vegetation NDVI in Association with Climatic, Environmental and Anthropogenic Factors in the Loess Plateau, China during 2000–2015: Quantitative Analysis Based on Geographical Detector Model. *Remote Sens.*, 13, 4380. <https://doi.org/10.3390/rs13214380>.

Chuvieco, E, Huete, A. **Fundamentals of satellite remote sensing**. CRC press, 433p. 2016.

Fensholt, R., Rasmussen, K., Nielsen, T. T., Mbow, C. Evaluation of earth observation based long term vegetation trends—Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 9, p. 1886-1898, 2009.

Fernandez-Figueroa, E. G., Wilson, A. E., Rogers, S. R. Commercially available unoccupied aerial systems for monitoring harmful algal blooms: A comparative study. **Limnology and Oceanography: Methods**, v. 20, n. 3, p. 146-158, 2022.

Ferreira, L. G.; Yoshioka, H.; Huete, A.; Sano, E. E. Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian Cerrado: An analysis within the Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazônia (LBA). **Remote Sensing of Environment**, 2003. DOI: 10.1016/j.rse.2002.09.003.

Gerardo, R., de Lima, I. P. Monitoring duckweeds (*Lemna minor*) in small rivers using sentinel-2 satellite imagery: application of vegetation and water indices to the Lis River (Portugal). **Water**, v. 14, n. 15, p. 2284, 2022.

Gitelson, A. A., Merzlyak, M. N. Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. **Advances in Space Research**, v. 22, n. 5, p. 689-692, 1998.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., Ferreira, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.

Huete, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

Herbst, I. Análise espaço-temporal da evolução do IBI e NDVI na zona oeste da cidade do Rio de Janeiro/RJ entre 2001 e 2020. **Revista de Geografia**, Juiz de Fora, v. 12, n. 2, p. 139-161, 2022.

Jiang, Z., Huete, A. R., Didan, K., Miura, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 10, p. 3833-3845, 2008.

Jiang, F., Deng, M, Long, Y., & Sun, H. Spatial Pattern and Dynamic Change of Vegetation Greenness From 2001 to 2020 in Tibet, China. *Front. Plant Sci.*, 13, 892625. <https://doi:10.3389/fpls.2022.892625>,2022.

Kim, Y., Kimball, J. S., Didan, K., Henebry, G. M. Response of vegetation growth and productivity to spring climate indicators in the conterminous United States derived from satellite remote sensing data fusion. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 194, p. 132-143, 2014.

Knipling, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 1, n. 3, p. 155-159, 1970.

Lillesand, T., Kiefer, R. W., Chipman, J. **Remote sensing and image interpretation**. John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2015.

Mahaut, L., Fort, F., Violle, C., & Freschet, G.T. Multiple facets of diversity effects on plant productivity: Species richness, functional diversity, species identity and intraspecific competition. *Functional Ecology*, 34(1), 287–298. 2020.

Meneses, P. R., Almeida, T. D. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: Universidade de Brasília (UNB), 2012.

Meyers, J. M., Dokoozlian, N., Ryan, C., Bioni, C., Vanden Heuvel, J. E. A new, satellite NDVI-based sampling protocol for grape maturation monitoring. **Remote Sensing**, v. 12, n. 7, p. 1159, 2020.

Mioto, C.L. Geotecnologias na análise das peculiaridades dos recursos hídricos da planície pantaneira. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, UFMS, Campo Grande, MS, Brasil, 2016.

Mirasi, A., Mahmoudi, A., Navid, H., Valizadeh Kamran, K., Asoodar, M. A. Evaluation of sum-NDVI values to estimate wheat grain yields using multi-temporal Landsat OLI data. **Geocarto International**, v. 36, n. 12, p. 1309-1324, 2021.

Neves, A. K.; Körting, T. S.; Fonseca, L. M. G.; Girolamo Neto, C. D.; Wittich, D.; Costa, G. A. O. P.; HEIPKE, C. Semantic segmentation of brazilian savanna vegetation using high spatial resolution satellite data and u-net. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. V-3-2020, p. 505-511, 3 ago. 2020. DOI: 10.5194/isprs-annals-V-3-2020-505- 2020

Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., Stenseth, N. C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. **Trends in ecology & evolution**, v. 20, n. 9, p. 503-510, 2005

Radocaj, D., Šiljeg, A., Marinović, R., Jurišić, M. State of major vegetation indices in precision agriculture studies indexed in web of science: A review. **Agriculture**, v. 13, n. 3, p. 707, 2023.

Reis, t.; Rsoo, g.; Ribeiro, v.; Moutinho, p.; Stábile, m.; Alencar, a.; silva, d. **Oportunidades e desafios climáticos no Cerrado brasileiro**. 2017.

Sankaran, S., Khot, L. R., Espinoza, C. Z., Jarolmasjed, S., Sathuvalli, V. R., Vandemark, G. J., Pavek, M. J. Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review. **European Journal of Agronomy**, v. 70, p. 112-123, 2015.

Scher, C.L. et al. (2020). Application of remote sensing technology to estimate productivity and assess phylogenetic heritability. *Applications in Plant Sciences*, 8(11), e11401. doi:10.1002/aps3.1140.

Souza, C. R., Augusto, V., Oliveira, W. J., Lammoglia, T. Detecção de exsudações de hidrocarbonetos por geobotânica e sensoriamento remoto multi-temporal: estudo de caso no Remanso do Fogo (MG). **Brazilian Journal of Geology**, v. 38, n. 2, p. 228-243, 2008.

Vélez, S., Martínez-Peña, R., Castrillo, D. Beyond vegetation: A review unveiling additional insights into agriculture and forestry through the application of vegetation indices. **J Multidisciplinary Scientific Journal**, v. 6, n. 3, p. 421-436, 2023.

Vélez, S., Rubio, J. A., Andrés, M. I., Barajas, E. Agronomic classification between vineyards ('Verdejo') using NDVI and Sentinel-2 and evaluation of their wines. **Vitis**, 2019.

Viana, J. Conceitos Básicos de SR. 2020. Disponível em: <http://www.ufrjr.br/institutos/it/de/acidentes/sr0.htm>. Acesso em: 01 de maio de 2024.