



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA – DFi -CCET

**CARACTERIZAÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO POR SENSORIAMENTO
REMOTO NO SEMIÁRIDO SERGIPANO**

RAFAEL MARLLUS DOS SANTOS

SÃO CRISTÓVÃO – SE
2023

RAFAEL MARLLUS DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO POR SENSORIAMENTO
REMOTO NO SEMIÁRIDO SERGIPANO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal de Sergipe como pré-requisito para obtenção do título de mestre em Física.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Santos da Silva

SÃO CRISTÓVÃO – SE
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
Programa de Pós-Graduação em Física

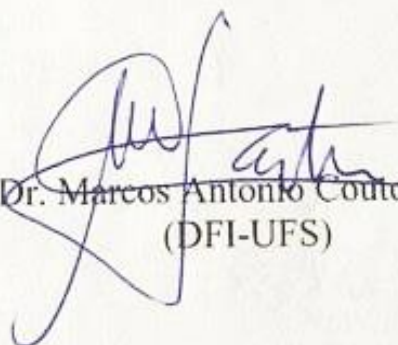
*“Caracterização de minérios de ferro por
sensoriamento remoto no semiárido sergipano”*

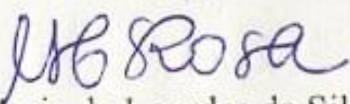
por

Rafael Marllus dos Santos

Dissertação de mestrado **APROVADA** em sessão pública no dia vinte e sete de fevereiro do ano dois mil e vinte e três perante a banca examinadora constituída pelos seguintes professores:


Prof. Dr. Ronaldo Santos da Silva
(DFI-UFS)


Prof. Dr. Marcos Antonio Couto dos Santos
(DFI-UFS)


Profa. Dra. Maria de Lourdes da Silva Rosa
(DGEOL-UFS)

“A educação é o nosso passaporte para o futuro, pois, o amanhã pertence as pessoas que se preparam hoje.”

Malcolm X

Dedico este trabalho a meus pais, irmãos,
e a minha noiva, que sempre me
apoiaram e incentivaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me proporcionar forças para ultrapassar as barreiras impostas a min. A minha noiva Jesiane Barreto que sempre esteve comigo, e por toda compreensão, amor, apoio e incentivo nos momentos que mais precisei. Aos meus pais, Josefa Eurides e Joalbo, meus irmãos Nicolas Maicon e Karina que sempre confiaram em mim, me apoiaram e estiveram presentes na minha vida me inspirando a buscar sempre mais. Além de todo carinho e paciência. Aos meus sogros e cunhados, que sempre torceram por min.

Agradeço ao meu orientador Ronaldo, por todos os ensinamentos, ajuda, atenção, oportunidade e confiança nessa jornada. Ao nosso grupo de pesquisa, e em especial, Maria Jussara, por toda ajuda no decorrer do trabalho.

Aos professores por todos os ensinamentos. A todos os colegas e amigos, em especial a Gilvan, por toda ajuda e confiança. E a todos que de alguma forma, possibilitaram a minha chegada até aqui.

Agradeço aos Integrantes da empresa parceira Inventos Geosoluções pelo apoio ao longo do projeto.

Gostaria de agradecer a Universidade Federal de Sergipe, pelo ensino de qualidade, e as agências Capes e CNPq, pela oportunidade de realizar essa pesquisa e pelo suporte financeiro concedido durante o mestrado.

RESUMO

O sensoriamento remoto tem apresentado uma enorme gama de aplicações nos últimos anos. Dentre elas existe a que permite a identificação de possíveis alvos de minerais sem a necessidade de estar presente em campo, por meio da interação entre a matéria e a energia eletromagnética emitida por uma determinada fonte. Nas regiões de Canindé de São Francisco/SE e Gararu/SE existem indícios de várias ocorrências de elementos químicos, como chumbo (Pb), cobre (Cu), manganês (Mn) e ferro (Fe), e para identificar essas ocorrências foram utilizados dados magnéticos, técnicas de combinações de bandas, e métodos de processamento de imagem de sensoriamento remoto nas bandas do visível e infravermelho de ondas curtas dos satélites Landsat-8 e Sentinel-2. Os resultados apresentados pelas técnicas aplicadas demonstraram diferentes características, indicando a possível identificação de alvos expostos de óxidos de ferro, minerais de hidroxila e áreas de vegetação. Por meio da comparação entre os resultados para as diferentes regiões é notado a presença de características semelhantes, apontando a possibilidade de existência de minerais ferrosos em ambas as regiões analisadas. Para verificação dos resultados, foram coletadas amostras em pontos específicos, previamente definidos, as quais passaram por análise utilizando a caracterização elementar de Fluorescência de raios X (FRX) e mineralógica por Difração de raios X (DRX).

Palavras chave: Sensoriamento remoto, Satélites, Minérios de ferro.

ABSTRACT

Remote sensing has presented a wide range of applications in recent years, among them there is the one that allows the identification of possible targets of minerals without the need to be present in the field, through the interaction between matter and the electromagnetic energy emitted by a certain source. In the regions of Canindé de São Francisco/SE and Gararu/SE there are indications of several occurrences of metallic minerals, such as lead (Pb), copper (Cu), manganese (Mn) and iron (Fe), and to identify these occurrences, magnetic data, band combination techniques and remote sensing image processing methods were used in the visible, near-infrared and short-wave infrared bands of the Landsat 8 and Sentinel-2 satellites. The results presented by the applied techniques showed different characteristics, indicating the possible identification of exposed targets of iron oxides, hydroxyl minerals and areas of vegetation. By comparing the results for the different regions, the presence of similar characteristics is noted, pointing to the possibility of the existence of ferrous minerals in both analyzed regions. To verify the results, samples were collected at specific points, previously defined, which were analyzed using elemental characterization by X-ray Fluorescence (FRX) and mineralogical characterization by X-ray Diffraction technique (XRD).

Keywords: Remote sensing, Satellites, Iron ores.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de varredura por espelho, utilizado por sensores passivos [15].	23
Figura 2: Sistema sensor com fonte passiva [6].	24
Figura 3: Principais moléculas presentes na atmosfera juntamente com suas janelas de absorção [26].	25
Figura 4: Curvas de irradiância no topo da atmosfera, no nível do mar e do corpo negro a 6000 K. E moléculas presente na atmosfera [1,16,18,26].	25
Figura 5: Demonstração do funcionamento do sensor, em que a parte ótica é responsável pelo direcionamento e separação das faixas espectrais, que serão detectados pelos sensores e convertidos em sinais elétricos. [15].	26
Figura 6: Demonstração do sistema multiespectral com o espectro dividido em quatro bandas espectrais [27].	27
Figura 7: Demonstração do sistema hiperespectral com o espectro dividido em trezentos e sessenta e três bandas espectrais [27].	27
Figura 8: Demonstração da formação da imagem com pixels [].	28
Figura 9: Níveis de coletas de dados utilizados no sensoriamento remoto [33].	30
Figura 10: Skywalker 1900, modelo utilizado para sobrevoar região designada em Gararu/SE.	34
Figura 11: Sensor multiespectral Parrot Sequoia [38].	35
Figura 12: Difração de Raios X por planos de átomos [].	36
Figura 13: Imagens do Landsat-8 com as regiões de a) Canindé do São Francisco/SE, com a cidade de Canindé indicada pelo marcador amarelo e b) Gararu/SE, com a cidade de Gararu indicada pelo marcador amarelo [49].	40
Figura 14: Imagens para a) Região de Canindé do São Francisco/SE, com a cidade de Canindé indicada pelo marcador amarelo e b) Região de Gararu/SE obtidas do satélite Sentinel-2, com a cidade de Gararu indicada pelo marcador amarelo [49].	40
Figura 15: MDE da região de Canindé de São Francisco/SE, da data de 19/02/2011, a cidade de Canindé está indicada com o marcador amarelo [53].	41
Figura 16: MDE da região de Gararu/SE, da data de 02/02/2011, a cidade de Gararu está indicada com o marcador amarelo [53].	42
Figura 17: As operações aritméticas causam transformações pixel a pixel nas bandas, gerando uma nova imagem [1].	46
Figura 18: Distribuição dos pixels após o processo de subtração entre as bandas espectrais [1].	48
Figura 19: Divisão entre duas bandas espectrais [1].	49
Figura 20: Mapa do Brasil, e em destaque o Estado de Sergipe com as regiões de estudo selecionadas para este trabalho, e as cidades de Canindé e Gararu com os sinalizadores em amarelo [].	54
Figura 21: Mapa do Brasil com as Províncias demarcadas, com destaque no Estado de Sergipe [78].	55
Figura 22: Mapa de Sergipe com as separações dos domínios e demais características presentes neles [78].	56

Figura 23: Mapa de Sergipe com a demarcação dos Jazimentos de minerais metálicos, não metálicos, calcários e energéticos e sais solúveis [78].	58
Figura 24: Deposições de FFBs [79].	60
Figura 25: Fontes de depósito de Ferro espalhadas pelo mundo [79,81].	61
Figura 26: Estrutura cristalina da magnetita [82].	61
Figura 27: Estrutura cristalina da hematita [82].	62
Figura 28: Estrutura cristalina da goethita [82].	63
Figura 29: Região de Canindé feita com as bandas do RGB para o Landsat-8 (a) e o Sentinel-2(b). A região destacada em verde e amarelo indicam, respectivamente, solos com alta reflectância e solo com tons mais avermelhados. Em preto é possível ver o Rio São Francisco.	65
Figura 30: NDVI para Canindé com bandas do Landsat-8 (a) e Sentinel-2 (b). Em cores avermelhadas estão destacadas as características da vegetação, em cores verdes representam locais sem vegetação.	67
Figura 31: Minerais de hidroxila com as bandas do Landsat-8 (a) e Sentinel-2 (b). Em cores avermelhadas estão destacadas as regiões que apresentam características de hidroxila.	68
Figura 32: As regiões destacadas indicam predominância de minerais ferrosos para: (a) Landsat-8 utilizando a razão das bandas 6/5; e (b) Sentinel-2 utilizando as bandas 11/8A.	70
Figura 33: Composição para óxidos de ferro para o Landsat-8 (a) e Sentinel-2 (b). Em cores avermelhadas é indicado características da presença de óxidos de ferro.	71
Figura 34: Composição colorida para região de controle, a qual utilizou a distribuição de Chica Olma (6/7, 6/5, 4/2) para o landsat-8 (a) e (11/12, 11/8A, 4/2) para o Sentinel-2 (b).	73
Figura 35: Composição Chica-Olma sobreposta no MDE para o Landsat-8 (a) e Sentinel-2 (b).	75
Figura 36: Região de Canindé de São Francisco, com jazimentos de Fe marcados [85].	76
Figura 37: Gradiente total do campo magnético anômalo para região de controle [74].	77
Figura 38: Região de Gararu feita com as bandas do RGB para o Landsat-8 (a) e Sentinel-2(b).	78
Figura 39: NDVI para região de Gararu/SE para os satélites Landsat-8 (a) e Sentinel-2 (b). Em cores avermelhadas são destacadas características da presença de vegetação.	79
Figura 40: Razão de bandas para minerais de hidroxila, que utilizam imagens do Landsat-8 (a) e Sentinel-2 (b). Em cores avermelhadas estão destacadas as características de hidroxila.	81
Figura 41: Razão de bandas para detectar minerais ferrosos Landsat-8 (a) e Santinel-2 (b). Em cores avermelhadas estão destacadas as características de minerais ferrosos.	82
Figura 42: Razão de bandas para óxidos de ferro, utilizando imagens do Landsat-8 (a) e do Sentinel-2 (b). Em cores avermelhadas estão destacadas as características de óxidos de ferro.	84
Figura 43: Composição de Chica-Olma para o sensor OLI (a) e MSI (b).	85

Figura 44: Composição Chica-Olma sobreposta no MDE para o Landsat-8 (a) e Sentinel-2 (b).....	87
Figura 45: Região de Gararu/SE no mapa geológico do Estado de Sergipe [85].	88
Figura 46: Gradiente total do campo magnético anômalo para região de Gararu/SE.	89
Figura 47: Áreas visitadas, pontos 1, 2 e 3, sobrepostas a composição apresentada na Figura 43, no ponto 4 foi feito o voo com o VANT.	90
Figura 48: Fotografia in-situ das amostras coletadas em campo na região de Gararu/SE, a) Granitoide da região 1, b) Xisto da região 2 e c) Rocha ultramáfica da região 3.	91
Figura 49: Gráficos de composição elementar para as amostras coletadas no domínio Macururé nas regiões: a) 1; b) 2; e c) 3.	92
Figura 50: Difractogramas de raios X das amostras coletadas nas regiões a) 1; b) 2; e c) 3. Foram identificadas as três fases com maior ocorrência.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resolução espectral e espacial do sensor MSI [,].	32
Tabela 2: Resolução espectral e espacial do sensor OLI [9].	33
Tabela 3: Demonstração da operação de divisão entre duas bandas espectrais [1].	49
Tabela 4: Porcentagem atômica dos elementos encontrados, através da técnica de FRX.	92

LISTA DE SIGLAS

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil
CBERS - China-Brazil Earth Resources Satellite
CLGeo - Condomínio de Laboratórios Multiusuários das Geociências
CPRM – Serviço Geológico Brasileiro
DOS – Dark Object Subtraction
DRX -Difração de Raio X
ESA – Agência Espacial Europeia
FFB – Formação Ferrífera Bandada
FOV – Field of View
FPC – Contador de Frequência Proporcional
GNF – Grupo de Nanomateriais Funcionais
GOE – Great Oxygenation Event
GSD – Ground Sample Distance
GSFC – Goddard Space Flight Center
LaSRC – Landsat Surface Reflectance Code
MDE – Modelo Digital de Elevação
MSI – MultiSpectral Instrument
MSS – multispectral Scanner System
NASA – National Aeronautic and Space Administration
NDVI – Normalized Difference Vegetation Index
NIR – Infravermelho próximo
NOE – Neoproterozoic Oxygenation Event
OLI – Operational Land Imager
QGC – QGround Control
RBV – Return Beam Vidicon
REM – Radiação eletromagnética
SAR – Synthetic Aperture Satellite
SC – Scintillation Counter
Sen2Cor – Sentinel-2 Correction
SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SRG – Sistema de Referência Global
SWIR – Infravermelho de ondas curtas
TIRS – Thermal Infrared Sensor
TM – Thematic Mapper
UFS – Universidade Federal de Sergipe
USGS – U.S. Geological Survey
VANT – Veículo aéreo não tripulado
VIS - Visível
VNIR – Visível e Infravermelho próximo
XRF- Fluorescência de Raios X

Sumário

1.	Capítulo 1 Introdução.....	16
1.1.	INTRODUÇÃO	17
1.2.	OBJETIVOS	18
2.	Capítulo 2 Fundamentação.....	19
2.1.	FUNDAMENTAÇÃO	20
2.2.	DEFINIÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO.....	20
2.3.	PRINCÍPIOS PARA O SENSORIAMENTO REMOTO.....	21
2.3.1.	FONTES.....	21
2.3.2.	RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	21
2.3.3.	SENSORES ATIVOS	22
2.3.4.	SENSORES PASSIVOS	24
2.3.5.	SENSORES E NÍVEIS DE COLETA DE DADOS	26
2.3.6.	RESOLUÇÃO ESPACIAL.....	28
2.3.7.	RESOLUÇÃO ESPECTRAL	29
2.3.8.	RESOLUÇÃO RADIOMÉTRICA.....	29
2.3.9.	RESOLUÇÃO TEMPORAL.....	29
2.3.10.	NÍVEIS DE COLETA	30
2.4.	PLATAFORMAS E SENSORES UTILIZADOS NA PESQUISA.....	31
2.4.1.	ALTITUDE ORBITAL	31
2.4.2.	BAIXA ALTITUDE.....	33
2.5.	ANÁLISES EM LABORATÓRIO	35
2.5.1.	DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	35
2.5.2.	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X.....	36
3.	Capítulo 3 Metodologia	38
3.1.	METODOLOGIA	39
3.2.	OBTENÇÃO DAS IMAGENS DE SATÉLITE.....	39
3.3.	PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM.....	42
3.4.	GEORREFERENCIAMENTO	43
3.5.	ELIMINAÇÃO DE RUÍDO	43
3.6.	CORREÇÃO ATMOSFÉRICA	44
3.6.1.	LaSRC – Landsat Surface Reflectance Code	44
3.6.2.	DOS – Dark Object Subtraction.....	45
3.6.3.	Sen2Cor – Sentinel-2 Correction.....	45

3.7. OPERAÇÕES ARITMÉTICAS COM AS IMAGENS	45
3.7.1. Soma.....	46
3.7.2. Multiplicação.....	46
3.7.3. Subtração	47
3.7.4. Divisão (Razão de Bandas).....	48
3.8. ÍNDICE DE VEGETAÇÃO.....	49
3.9. COMPOSIÇÕES PARA IDENTIFICAÇÃO DE MINÉRIO	50
3.10. DADOS AEROMAGNETOMÉTRICO	51
3.11. SOFTWARE PARA ANÁLISE DAS IMAGENS.....	51
4. Capítulo 4 Área de estudo	53
4.1. ÁREA DE ESTUDO	54
4.2. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS	54
4.3. RECURSOS MINERAIS.....	57
4.4. CARACTERÍSTICAS DO MINÉRIO DE FERRO	59
4.4.1. Magnetita.....	61
4.4.2. Hematita	62
4.4.3. Goethita.....	62
5. Capítulo 5 Resultados e discussões	64
5.1. RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
5.2. CANINDÉ DE SÃO FRANCISCO - REGIÃO CONTROLE.....	65
5.3. REGIÃO DE GARARU/SE.....	77
5.3.1. MISSÃO DE CAMPO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AMOSTRAS DE SOLO	89
6. Capítulo 6 Conclusão.....	95
6.1. CONCLUSÕES	96
7. Capítulo 7 Sugestões para trabalhos futuros	97
7.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	98
8. Capítulo 8 Referências bibliográficas.....	99
8.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

Capítulo 1

Introdução

1.1. INTRODUÇÃO

O reconhecimento da superfície terrestre é de fundamental importância ele pode auxiliar e favorecer o avanço tecnológico em diversas áreas do conhecimento, como por exemplo, a geologia, cartografia e áreas de segurança ambiental [1-4]. Diversos métodos têm sido aplicados para se obter o reconhecimento de uma região específica, dentre eles estão o reconhecimento terrestre e aéreo. No reconhecimento terrestre é necessário o deslocamento em campo, a pé, ou com um meio de transporte auxiliar, enquanto são feitos os registros. No reconhecimento aéreo, existem diversas plataformas, as quais apresentam níveis de altitude e características próprias [1,3,5,6]. As plataformas utilizadas no sensoriamento remoto permitem o reconhecimento local de regiões de difícil acesso, verificação e controle de áreas com cobertura vegetal e construção de mapas cartográficos, de forma rápida, baixo custo e número reduzido de profissionais [2-5,7,8].

Com o avanço tecnológico, novas ferramentas foram desenvolvidas para obter informações regionais com enorme resolução. Esse novo método recebeu o nome de sensoriamento remoto, o qual teve origem com a construção das câmeras fotográficas, e foram aplicadas em diversos momentos [1,3,5,6,8]. Como por exemplo, para obter dados que auxiliassem na construção de rodovias [5], detecção de incêndios e desmatamentos florestais [4], assim como, para reconhecimento militar e identificação de alvos inimigos [6]. Mas, foi com os lançamentos dos satélites que ocorreram grandes desenvolvimentos para o sensoriamento remoto. Algumas destas missões são: a missão Landsat, da NASA (National Aeronautics and Space Administration) [9], a missão Sentinel, da ESA (Agência Espacial Europeia) [10] e a missão CBERS, que surgiu com a parceria entre o Brasil e a China no ano de 1988 [11].

Agora, com os sensores posicionados em altitude orbital, as informações de grandes áreas são obtidas periodicamente [1,2,6-8], permitindo estudos geológicos, cartografia de precisão, levantamento de recursos naturais e monitoramento ambiental. Por exemplo, foi possível citar o desprendimento de um iceberg da Antártida, noticiado no mês de janeiro de 2023, o qual estava sendo acompanhado por cerca de dois anos, com imagens do satélite europeu Sentinel-2 [12,13].

1.2.OBJETIVOS

Geral:

- Fazer a caracterização para os minérios de ferro nas regiões de Canindé de São Francisco e Gararu, por meio do sensoriamento remoto utilizando imagens de satélites.

Específicos:

- Obter imagens dos satélites Landsat-8 e Sentinel-2 para a região de Canindé de São Francisco/SE e Gararu/SE com a menor quantidade de vegetação possível.
- Aplicar técnicas de processamento para realçar características específicas.
- Caracterização mineralógica por Difração de Raios X e elementar por Fluorescência de Raios-X.

Capítulo 2

Fundamentação

2.1. FUNDAMENTAÇÃO

Na superfície da Terra existem muitos lugares pouco explorados ou mesmo nunca visitados [1,14]. Isso se deve ao fato de que existem diversas formas de visualizar áreas de difícil acesso por meio do uso de imagens. Essa forma de obtenção de informações pode ser extremamente útil para descobrir recursos naturais, como minérios [14] e vegetação [1,3,5], em regiões remotas. Caso esses recursos sejam encontrados, as indústrias de mineração podem buscar formas de extraí-los, o que pode representar um grande avanço tecnológico.

Esse tipo de aquisição de informações a longas distâncias, sem a necessidade de contato físico com o objeto ou corpo, é conhecido como sensoriamento remoto [4,6]. Com o passar dos anos, essa tecnologia tem se mostrado versátil, tendo aplicações em diversas áreas, como construção, agricultura, geologia, monitoramento de desastres, vigilância de minas e detecção de corpos ferrosos [3,5,6,14,15].

2.2. DEFINIÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto é uma técnica amplamente utilizada para coleta de dados por meio de instrumentos montados em plataformas como aeronaves, veículos aéreos não tripulados (VANTs), satélites ou plataformas terrestres [16]. Estes equipamentos permitem a obtenção de informações detalhadas sobre a superfície da Terra, ocasionando a diminuição de custos e riscos associados a operações terrestres [15]. Além disso, o sensoriamento remoto também permite o mapeamento de áreas de difícil acesso, geralmente com menos pessoas, reduzindo os gastos com viagens a campo.

O sensoriamento remoto permite a obtenção de informações precisas por meio da detecção e determinação das alterações que um objeto impõe ao campo eletromagnético [15,16]. Essas alterações são transformadas em sinais elétricos ou números digitais, que são registrados ou transmitidos em tempo real, permitindo a descrição de características presentes na superfície. O sensoriamento remoto se baseia na propagação da radiação eletromagnética, que não precisa de um meio material para se propagar, permitindo assim a

coleta de informações por meio de instrumentos posicionados em grandes distâncias [6,15].

Equipamentos de detecção de ondas eletromagnéticas são utilizados para identificar e rastrear alvos a distância. A capacidade de detectar ondas refletidas ou emitidas pelo alvo permite que esses equipamentos sejam posicionados fora do alcance direto do alvo, possibilitando a implantação em diversas plataformas [1]. Esses equipamentos são capazes de coletar dados da superfície alvo, variando desde poucos centímetros até alguns quilômetros, dependendo do sensor e da altitude em que está posicionado [15].

2.3. PRINCÍPIOS PARA O SENSORIAMENTO REMOTO

2.3.1. FONTES

Para estudar alvos na superfície da Terra, é crucial contar com uma fonte de radiação eletromagnética (REM), seja ela natural ou artificial, e compreender as interações entre as REM e a matéria, como vegetação, água e solos [15-17]. Como todos os corpos com temperatura acima de 0 K emitem REM, é importante conhecer as características dessas emissões, pois são elas que serão detectadas pelos sensores [1,6,18]. É necessário entender como essas radiações se comportam e como se relacionam com os alvos, para que se possa obter informações precisas e úteis.

2.3.2. RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A radiação eletromagnética é um fenômeno que se origina a partir do movimento de cargas elétricas. Segundo a teoria eletromagnética de James Clerk Maxwell, todo movimento de cargas elétricas gera uma oscilação de campos elétrico e magnético, que se propagam através do espaço na forma de ondas eletromagnéticas. Essas ondas são caracterizadas por uma frequência, que é a medida da velocidade de oscilação dos campos elétrico e magnético, e por um comprimento de onda, que é a distância entre duas frentes de onda consecutivas. De acordo com a teoria eletromagnética quanto maior a frequência da radiação eletromagnética maior será sua energia. Isso significa que ondas eletromagnéticas de frequência mais alta têm mais energia do que ondas de frequência mais baixa. A radiação eletromagnética pode ser classificada em várias faixas de comprimento de onda, desde as ondas de

rádio, cujo comprimentos de onda são maiores, até os raios gama, com comprimentos de onda muito pequenos. Cada faixa de comprimento de onda tem suas próprias características [19].

A radiação eletromagnética pode interagir com a matéria de diferentes maneiras. Uma dessas interações é a absorção, que ocorre quando a radiação eletromagnética é absorvida por um material e transformada, por exemplo, em energia térmica. Outra interação é a reflexão, que ocorre quando a radiação eletromagnética é refletida pelo material. Ainda existe a refração, que ocorre quando a radiação eletromagnética é refratada ao passar através de um meio transparente com uma determinada refração [19].

A radiação eletromagnética pode ser gerada por fontes diferentes, classificadas como naturais, como o sol, e artificiais, geradas por antenas [15,20,21]. Os equipamentos de detecção de ondas eletromagnéticas podem ser projetados para trabalhar com essas diferentes fontes, recebendo classificações específicas, como sensores ativos e sensores passivos [15-18,22-24]. Os sensores ativos emitem sua própria radiação eletromagnética para iluminar o alvo, enquanto os sensores passivos detectam a radiação eletromagnética emitida naturalmente pelo alvo ou refletida pelo ambiente. Cada tipo de sensor tem suas próprias vantagens e desvantagens, e é importante escolher o tipo adequado para a aplicação específica [15,17,20].

2.3.3. SENSORES ATIVOS

Os sensores ativos possuem sua própria fonte de energia eletromagnética, como radares instalados em plataformas de transporte, que emitem energia para os alvos a serem detectados na superfície terrestre [1,15,17,18,20,23,24]. A energia refletida pelos alvos é detectada pelos sensores e esses dados são convertidos em sinais elétricos ou números digitais, armazenados ou enviados para análise. Esse tipo de sistema pode ser utilizado independentemente das condições meteorológicas, o que é uma vantagem em relação aos sistemas passivos, mesmo que não forneça informações tão detalhadas sobre as características físicas e químicas do alvo [1,15,18,24].

Estão presentes nos satélites Landsat-8 e Sentinel-2 sensores classificados como ativos, cuja faixa de cobertura depende do ângulo de visão

do sensor (FOV - Field of View). O Landsat-8 transporta o sensor Thematic Mapper (TM), varrendo 185 km transversalmente ao sentido da órbita [9,15]. Ele opera utilizando a técnica de varredura por espelho, como mostrado na Figura 1. A REM refletida pelos alvos incide sobre um espelho plano móvel que se encontra a um ângulo de 45° , o qual está sobre um eixo mecânico que permite um movimento oscilatório. Esse direcionamento da radiação eletromagnética para o sensor permite o processamento dos dados para geração das imagens.

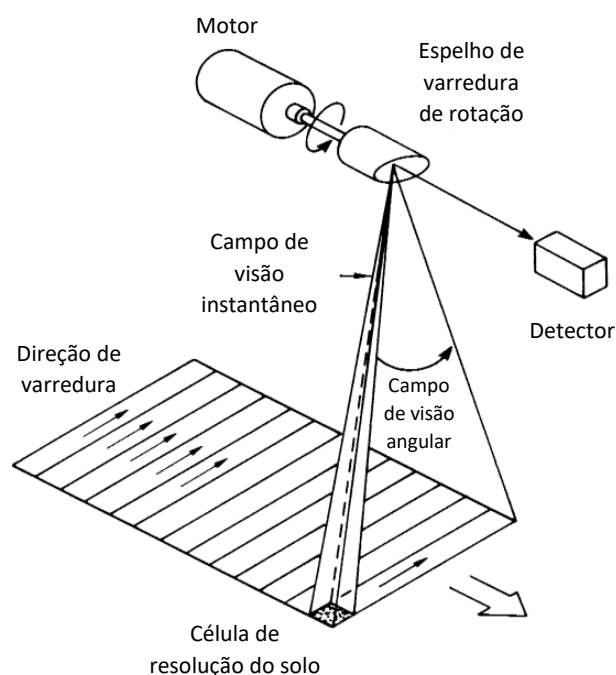


Figura 1: Sistema de varredura por espelho, utilizado por sensores passivos [15].

Enquanto o sensor ativo presente no Sentinel-2 é o Synthetic Aperture Satellite-SAR [10], com a capacidade de obter imagens tanto durante o dia quanto à noite, sem sofrer interferência atmosférica. Ele utiliza a técnica de radar de abertura sintética, que permite a obtenção de imagens de alta resolução mesmo para alvos distantes. Além disso, o SAR é capaz de “penetrar” em nuvens e escuridão, o que permite a obtenção de imagens em condições climáticas adversas, tornando-o uma ferramenta valiosa para aplicações como a monitoramento de desastres naturais, agricultura e cartografia.

2.3.4. SENSORES PASSIVOS

Os sensores passivos de detecção de ondas eletromagnéticas dependem de fontes externas, sem a presença de uma fonte própria de energia eletromagnética (Figura 2). O sol é a principal fonte passiva para estudos terrestres, devido à grande quantidade de energia emitida [15,17,18,20,24]. A variação da quantidade de energia incidente sobre a matéria em um intervalo de tempo é conhecida como fluxo radiante. Levando em consideração que o fluxo radiante incide sobre uma determinada superfície de um alvo, a densidade de fluxo radiante incidente é denominada de irradiância. Os sensores passivos são utilizados para medir a irradiância e analisar como a energia solar é refletida, transmitida e absorvida pelo alvo [16,17].

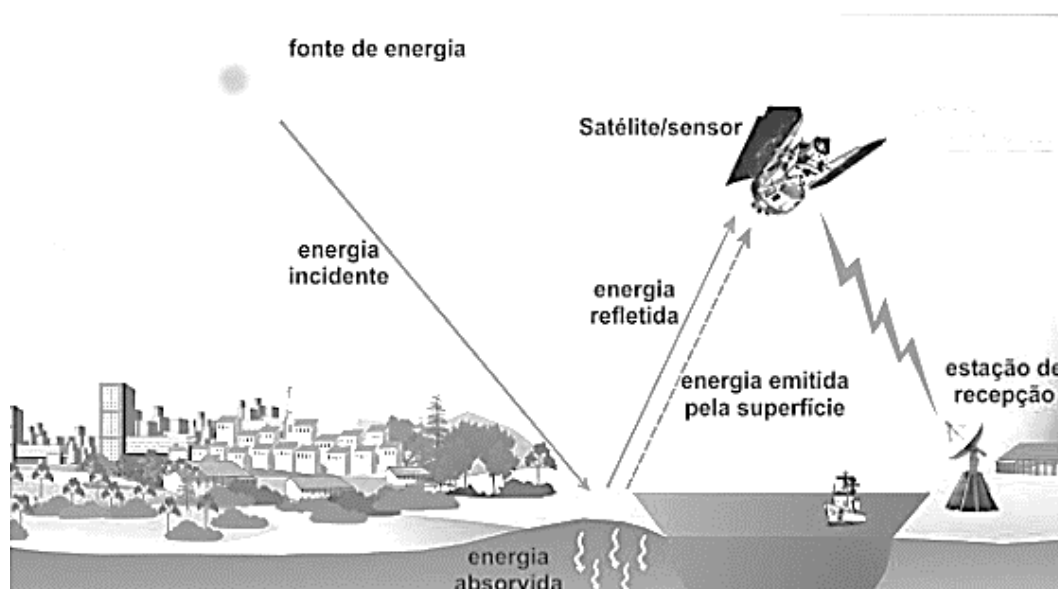


Figura 2: Sistema sensor com fonte passiva [6].

A variação da energia que chega na superfície terrestre é diferente da quantidade que chega no topo da atmosfera, devido aos efeitos da atmosfera [17]. Os componentes presentes na atmosfera causam uma série de desvios e absorções, formando regiões conhecidas como janelas de absorção, demonstradas na Figura 3 [17,18,25]. As janelas de absorção impedem a passagem da radiação parcial ou completamente, enquanto as regiões em que a radiação consegue passar com maior facilidade, é denominada de janelas atmosféricas. Essas janelas de absorção e janelas atmosféricas podem ser vistas na Figura 4 [1,18,26].

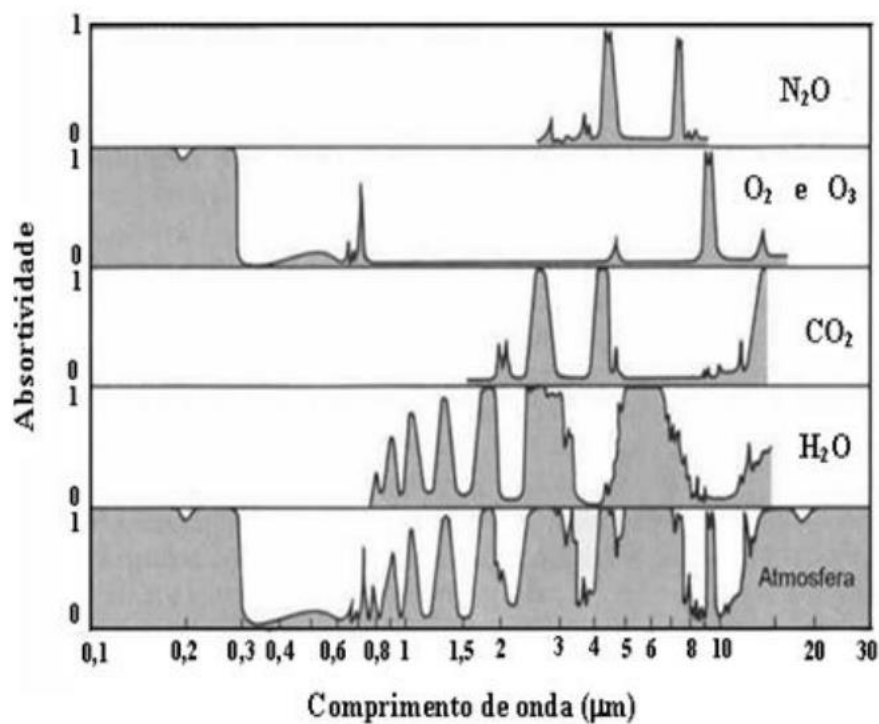


Figura 3: Principais moléculas presentes na atmosfera juntamente com suas janelas de absorção [26].

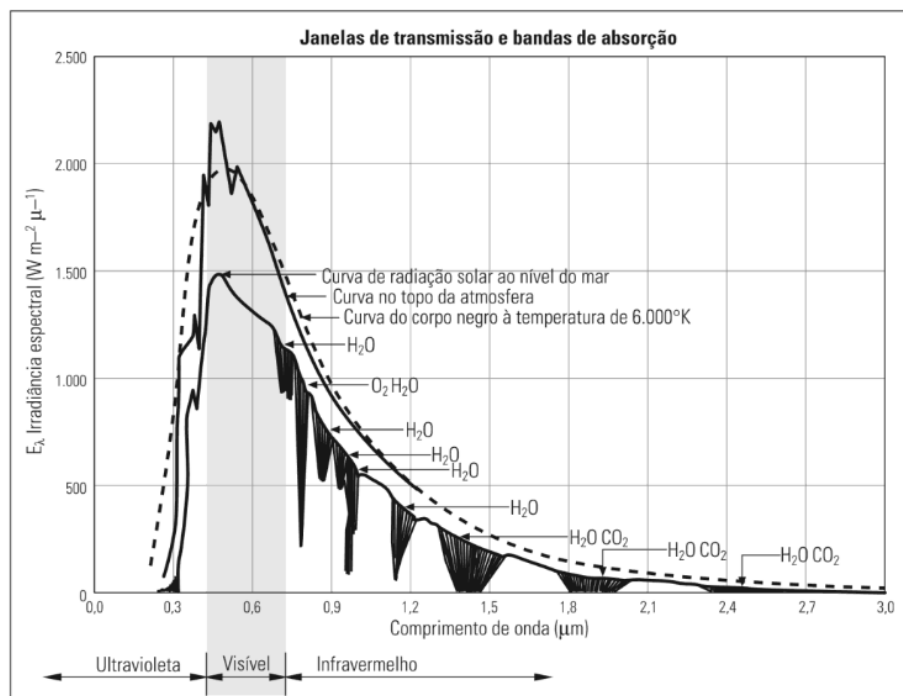


Figura 4: Curvas de irradiância no topo da atmosfera, no nível do mar e do corpo negro a 6000 K. E moléculas presente na atmosfera [1,16,18,26].

Uma das principais características do sensoriamento remoto é o seu enfoque nas janelas atmosféricas, que são regiões espectrais nas quais a atmosfera é relativamente transparente, permitindo que os sensores captem a luz que atinge a superfície [18,25]. Essas janelas estão presentes pelo espectro eletromagnético como por exemplo nos espectros do visível, infravermelha e micro-ondas [16]. Ao obter as informações dos alvos, os sensores transferirão essas informações quando ocorre a interação entre o alvo e o sensoriamento remoto. O resultado dessa interação dependerá das propriedades elétricas e magnéticas dos alvos, o que implicará na quantidade de energia absorvida e refletida.

2.3.5. SENSORES E NÍVEIS DE COLETA DE DADOS

Para detecção de informações superficiais à distância, são utilizados sensores capazes de detectar energia eletromagnética, como ilustrado na Figura 5. Esses sensores podem ser classificados como sistemas imageadores, que geram imagens da área de coleta de dados, ou sistemas não-imageadores, que produzem resultados em forma de gráficos ou dados numéricos [1,5,6].

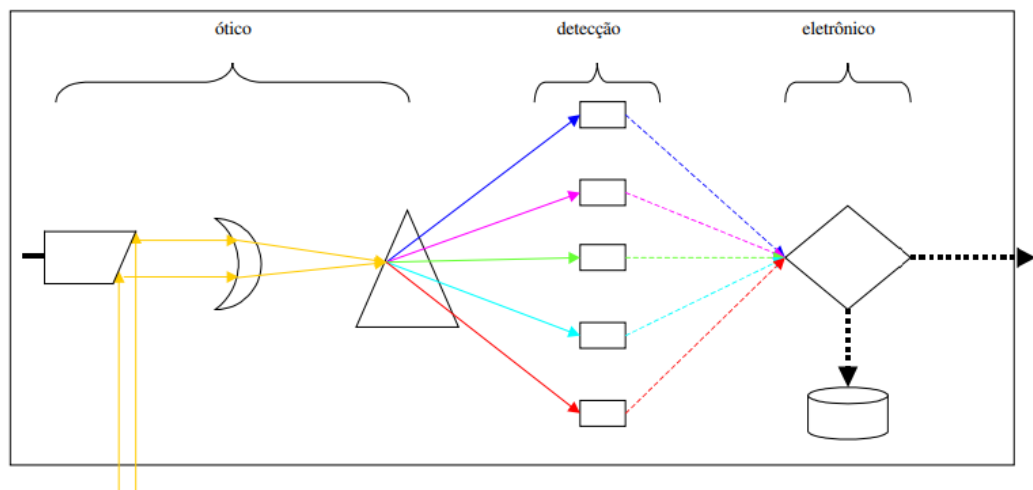


Figura 5: Demonstração do funcionamento do sensor, em que a parte ótica é responsável pelo direcionamento e separação das faixas espectrais, que serão detectados pelos sensores e convertidos em sinais elétricos. [15].

Os sensores também variam quanto à quantidade de bandas espectrais que eles podem detectar. Os sensores multiespectrais tem uma quantidade

As resoluções espacial, espectral, radiométrica e temporal são características importantes que devem ser consideradas ao escolher qual sensor utilizar para uma determinada aplicação [1,6,8,18,23]. Nas próximas seções, serão discutidas essas características.

2.3.6. RESOLUÇÃO ESPACIAL

A resolução espacial, também conhecida como GSD (Ground Sample Distance) [30], é uma característica crítica que deve ser considerada antes da seleção e utilização de um sensor. Ela é a relação entre o tamanho do pixel e a área de terreno correspondente, e é diretamente relacionada à capacidade do sensor de identificar e distinguir objetos de interesse [1,6,8,15,17,18,23]. A resolução espacial é afetada por diversos fatores, incluindo a altitude de operação, a distância focal das lentes e o detector utilizado, e pode variar significativamente entre diferentes tipos de sensores. Quanto menor o tamanho do pixel (GSD), maior a resolução espacial e mais fácil é identificar objetos, como mostrado na Figura 8 [15,18,23]. Por exemplo, os satélites Landsat-8 tem a capacidade de gerar pixels de aproximadamente 30 metros [2,9,15]. Isso significa que eles são capazes de produzir imagens detalhadas, mas não tão precisas quanto outros sensores com menor GSD.

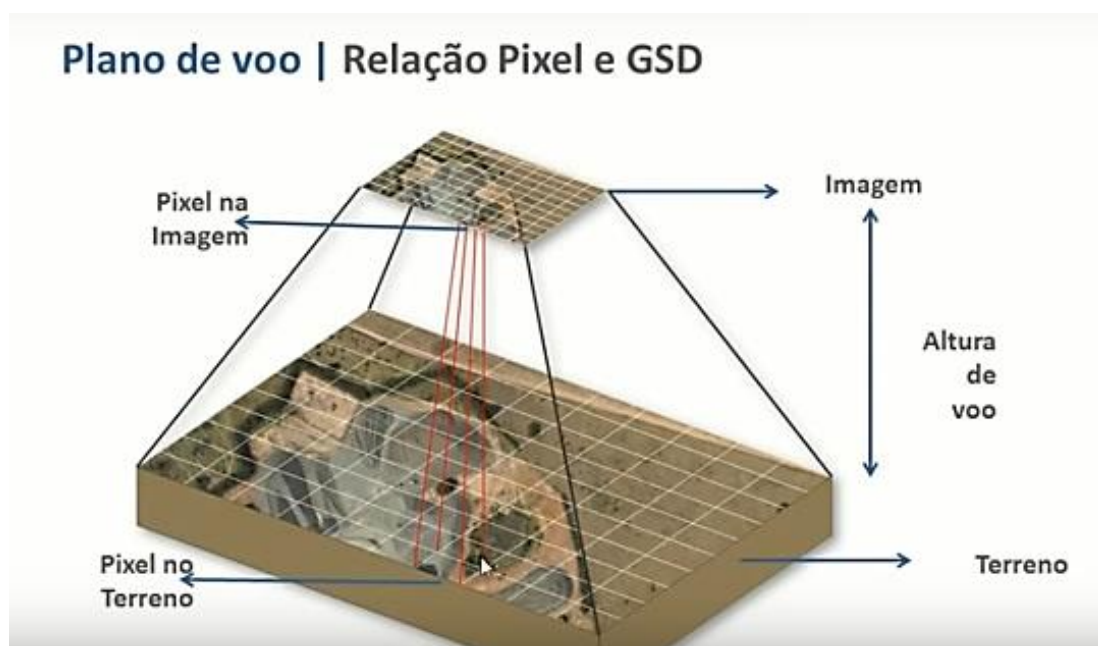


Figura 8: Demonstração da formação da imagem com pixels [31].

2.3.7. RESOLUÇÃO ESPECTRAL

No sensoriamento remoto, a REM capturada pelo sensor é decomposta em pequenas faixas espectrais, também conhecidas como bandas espectrais. A quantidade de bandas presentes em um sensor é diretamente proporcional à sua resolução espectral [1,6,8,17,18]. Sensores multiespectrais apresentam uma menor quantidade de bandas, e, conseqüentemente, uma resolução espectral inferior em comparação aos sensores hiperespectrais, que apresentam centenas de bandas [27].

2.3.8. RESOLUÇÃO RADIOMÉTRICA

Resolução radiométrica ou nível de cinza, está relacionado com o valor da radiância que deixa a superfície do terreno correspondente a cada pixel. Os valores estão relacionados com a quantidade de bits utilizados, sendo iguais a $2^{(QtdBits)}$ (dois elevado a quantidade de bits) [1,6,15,23].

Esses bits que irão apresentar maior detalhamento na imagem durante as composições, uma imagem formada com dados de um sensor que utiliza apenas 8 bits apresenta tons não tão detalhados quanto uma imagem com 10 bits por exemplo, já que no primeiro caso a quantidade de tons de cinza para o pixel varia entre 0 a 255, enquanto que no segundo 0 a 1023 tons [1,6,8,18].

2.3.9. RESOLUÇÃO TEMPORAL

A resolução temporal é a capacidade de um sensor de capturar a evolução de uma determinada área ou processo ao longo do tempo. Ela é expressa em unidades de tempo, como dias, horas ou minutos, e indica com que frequência o sensor pode capturar novas imagens da área de interesse [6]. Está diretamente relacionada com o período de revisita, que é o tempo que um satélite leva para voltar a visitar uma mesma região observada. Quanto menor for a resolução temporal, menor será o período de revisita, o que significa que o satélite pode capturar imagens da mesma área com maior frequência [1,18].

A resolução temporal é afetada por diversos fatores, tais como a frequência de operação do sensor, as condições climáticas e a geometria da plataforma de sensoriamento. Sensores ópticos, como câmeras, geralmente têm uma resolução temporal mais alta do que os sensores de radar, que

podem capturar imagens em condições de baixa visibilidade, mas tendem a ter uma resolução temporal menor [32].

Em geral, a resolução temporal é uma medida crítica na escolha de um sensor para uma determinada aplicação, pois ela influencia diretamente na capacidade de monitoramento de processos dinâmicos e, conseqüentemente, na qualidade e precisão das informações obtidas, por exemplo o Landsat-8, possui uma resolução espacial de dezesseis dias [8,9,15], enquanto o Sentinel-2 apresenta uma resolução temporal superior, igual a cinco dias [10]. É importante levar em consideração as necessidades e objetivos da aplicação específica ao selecionar a resolução temporal adequada. Além disso, é importante lembrar que a resolução temporal não é a única medida de desempenho de um sensor e deve ser avaliada em conjunto com outras medidas, como a resolução espacial [15].

2.3.10. NÍVEIS DE COLETA

A utilização dos sensores pode ocorrer também em diferentes níveis, conforme mostrado na Figura 9. O objetivo é aumentar ou aproximar a distância entre o sensor e o alvo de estudo [16,18,33,34].

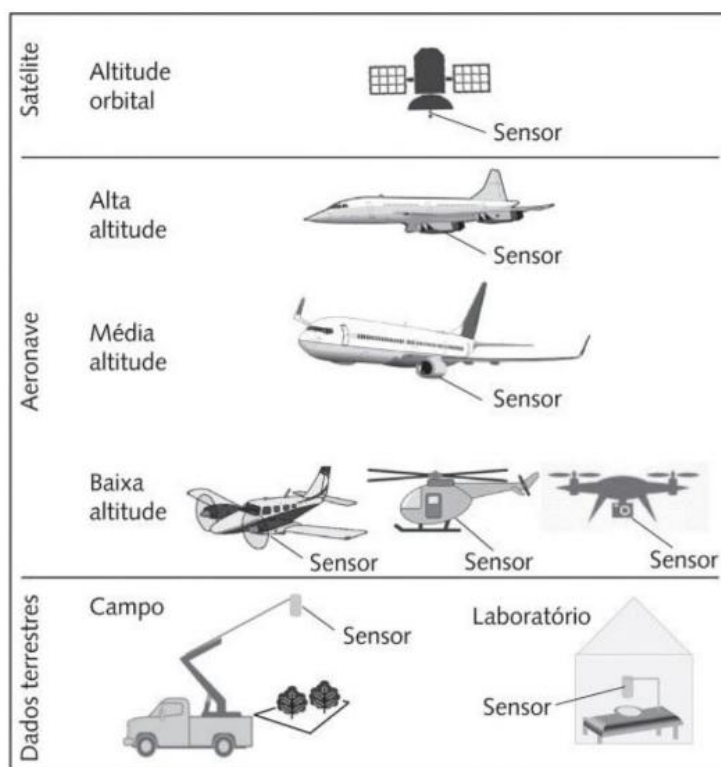


Figura 9: Níveis de coletas de dados utilizados no sensoriamento remoto [33].

Os níveis são classificados como:

Terrestre: nesse nível, é necessário estar em campo carregando um equipamento ou em laboratório com amostras obtidas no local de estudo [5,6,18,33].

Aeronave: variando entre baixa, média e alta altitude, neste nível os equipamentos são acoplados em aeronaves, obtendo informações com alta resolução espacial em curtos períodos [5,14,18,33].

Orbital: aqui os equipamentos estão a bordo de satélites, permitindo a captura de informações de grandes áreas, com menor resolução espacial, mas que torna possível o monitoramento periódico dela, por deter uma resolução temporal de poucos dias [5,18,33].

2.4. PLATAFORMAS E SENSORES UTILIZADOS NA PESQUISA

Durante a pesquisa foram utilizados sensores em plataformas em altitude orbital e baixa altitude, bem como análise feita em laboratório. Isso permitiu a obtenção de uma compreensão mais completa da região escolhida e sua composição superficial aflorante. A combinação dessas diferentes plataformas e técnicas de coleta de dados permitiu ter uma visão mais detalhada e precisa da região.

2.4.1. ALTITUDE ORBITAL

Os sensores utilizados em altitude orbital foram os MSI (MultiSpectral Instrument) [10] e OLI (Operational Land Imager) [9], que fazem parte das missões Sentinel-2 e Landsat, respectivamente. A missão Sentinel-2 é uma colaboração entre a Agência Espacial Europeia (ESA), a Comissão Europeia, a indústria, os provedores de serviços e os usuários de dados, contando com mais de sessenta empresas para construção e otimização do equipamento. O objetivo é fornecer dados terrestres, apoiando a vegetação, cobertura da terra e o monitoramento ambiental [10].

O MSI está presente nos satélites Sentinel-2, em operação desde 2015, fornecendo imagens multiespectrais com resolução radiométrica de 10 bits, resolução espacial de até 10 m e resolução temporal de 5 dias. Ele adquire treze bandas espectrais que se encontram dentro da faixa do visível e infravermelho próximo (VNIR) a infravermelho de ondas curtas (SWIR), apresentadas na Tabela 1 [10].

Tabela 1: Resolução espectral e espacial do sensor MSI [35,36].

Nº da Banda	Comprimento de onda central (nm)	Largura de banda (nm)	Resolução espacial (m)
1	443	20	60
2	490	65	10
3	560	35	10
4	665	30	10
5	705	15	20
6	740	15	20
7	783	20	20
8	842	115	10
8A	865	20	20
9	945	20	60
10	1375	30	60
11	1610	90	20
12	2190	180	20

A missão Landsat foi iniciada na década de 60 pela Agência Espacial Americana, com o objetivo de observar os recursos naturais terrestres. Ela conta com uma série de 8 satélites até o momento, gerenciados pela NASA e U.S. Geological Survey (USGS). Os primeiros satélites operavam com as câmeras Return Beam Vidicon (RBV) e com a Multispectral Scanner System (MSS), mas a partir do quarto satélite, lançado em 1982, houve uma alteração e passou a trabalhar com a MSS e com o sensor Thematic Mapper (TM), e à medida que os anos passavam os sensores foram sendo aprimorados [9].

O Landsat-8 foi lançado em 2013 com o sensor OLI e TIRS (Thermal Infrared Sensor), com o objetivo de dar continuidade a obtenção de dados dos recursos naturais terrestres, disponibilizando imagens e dados desde a década de 70. O sensor OLI trabalha nas faixas espectrais do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas, e possui uma banda pancromática com 15 m de resolução espacial, o que permite composições coloridas com melhores resoluções. Ele opera com 12 bits, permitindo alto detalhamento nas imagens, resolução espacial de até 15 m e resolução temporal de 16 dias, possuindo um total de nove bandas espectrais, conforme apresentado na Tabela 2 [9].

Tabela 2: Resolução espectral e espacial do sensor OLI [9].

Nº da Banda	Comprimento de onda central (nm)	Largura de banda (nm)	Resolução espacial (m)
1	433	20	30
2	450	15	30
3	525	75	30
4	630	50	30
5	845	40	30
6	1560	40	30
7	2100	200	30
8	500	180	15
9	1360	30	30

Os dados do sensor MSI são complementares aos dados do Landsat-8 com o sensor OLI, permitindo uma análise mais abrangente e detalhada da superfície terrestre [36]. Como ambos os sensores possuem faixas espectrais similares, as imagens geradas podem ser combinadas, comparadas e utilizadas para diferentes finalidades.

2.4.2. BAIXA ALTITUDE

É possível apresentar plataformas de baixa altitude, um exemplo é o VANT de asa fixa, modelo Skywalker 1900 (Figura 10), com modificações feitas

no decorrer do tempo para aumentar sua robustez e segurança, com fortalecimento de peças com fibra de carbono para evitar possíveis danos durante o pouso. É indicado que possui autonomia de voo de 25 minutos [37]. Neste trabalho, o voo foi realizado a uma altitude de 150 metros (em relação ao ponto mais elevado do terreno), seguindo as regulamentações da ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil), com velocidade de 11 m/s.



Figura 10: Skywalker 1900, modelo utilizado para sobrevoar região designada em Gararu/SE.

Na parte inferior do veículo foi embarcado um sensor multiespectral *Parrot Sequoia* (Figura 11) que tem uma câmera RGB com resolução de 16 megapixels e quatro sensores adicionais com resolução de 1,2 megapixels cada. Estes sensores captam as faixas espectrais do verde (550 nm com largura de 40 nm), vermelho (660 nm com largura de 40 nm), borda vermelha (735 nm com largura de 10 nm) e infravermelho próximo (790 nm com largura de 40 nm) [14,38]. Estes sensores permitem a obtenção de imagens multiespectrais com alta resolução, o que é ideal para aplicações em agricultura, meio ambiente, geologia, entre outras.



Figura 11: Sensor multiespectral Parrot Sequoia [38].

O plano de voo pode ser feito utilizando o software QGC (QGround Control), o qual fornece o controle e o planejamento de voo. Como é um software de código aberto e gratuito, é possível evoluí-lo de acordo com as necessidades do projeto. Ele é amplamente utilizado na comunidade de VANTs e é compatível com diversos tipos de veículos. O QGC permite a programação de rotas, definição de *waypoints*, monitoramento em tempo real e geração de relatórios de voo, proporcionando uma maior segurança e precisão na operação [39].

2.5. ANALISES EM LABORATÓRIO

2.5.1. DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Por meio da difração de raios X é possível analisar estruturas atômicas, visando que ela se encontra entre os raios gama e os raios ultravioleta [40]. Essa técnica é aplicada para descrever padrões e identificar a fase cristalina dos sólidos ao terem um feixe de raios X incidindo sobre eles [41,42]. Os Raios X interagem com os átomos da estrutura, que estão distribuídos em planos cristalinos e formam um padrão de difração (Figura 12). Quando este padrão é construtivo, a Lei de Bragg (Equação 1) pode ser aplicada.

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

em que, n é um número inteiro, λ é o comprimento de onda dos raios X incidentes, d é a distância interplanar e θ é o ângulo de difração.

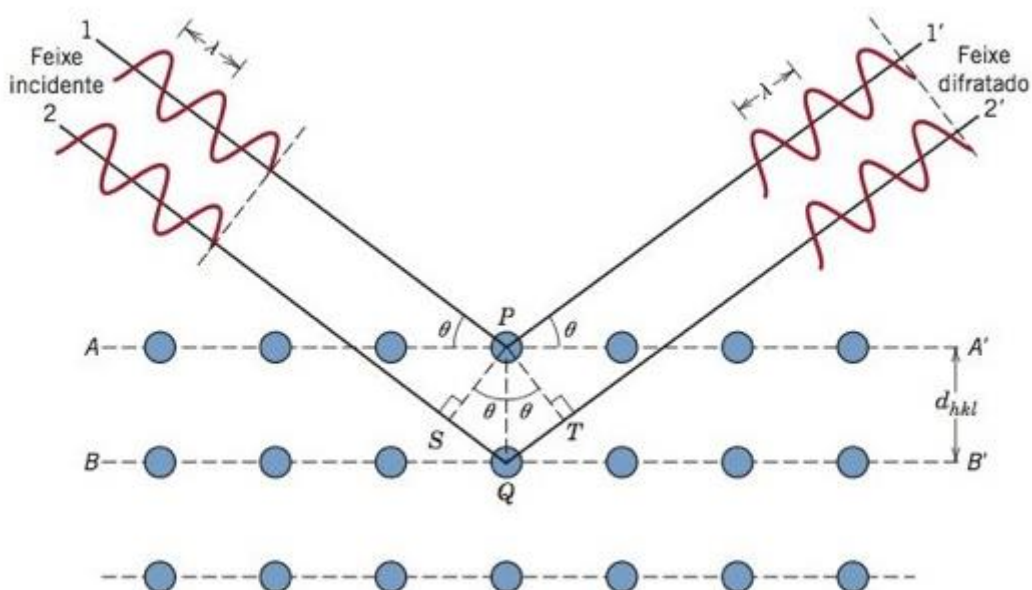


Figura 12: Difração de Raios X por planos de átomos [43].

No presente trabalho as medidas foram realizadas no Departamento de Física da Universidade federal de Sergipe (UFS), pelo Grupo de nanomateriais funcionais (GNF) equipamento de Difratorômetro de Raios X do modelo Rigaku, utilizando radiação $\text{Cu K}\alpha$, operando a 40kV/30mA. Todas as amostras passaram por uma varredura contínua entre os ângulos de 10° - 80° , com passo igual a 0,02 e velocidade de $4^\circ/\text{min}$.

2.5.2. FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

Conhecer a composição e as características químicas e físicas da matéria é muito importante, pois elas implicam em possíveis aplicações nas mais variadas áreas de conhecimento [44,45,46]. Uma das formas de obter essas informações é por meio da técnica de Fluorescência de Raios X (XRF), a qual permite identificar a devida concentração de elementos entre oxigênio (O), e urânio (U) [46], de uma determinada amostra ou objeto. Essa técnica permite diversas aplicações, nas indústrias, para verificação de qualidade de produtos [44], em explorações geológicas [44], para verificação da composição de rochas e da mineralogia de solos [44,46,47].

As medidas foram realizadas no Condomínio de Laboratórios Multiusuários das Geociências (CLGeo) da UFS, em que foi utilizado o

equipamento XRF-1800 da marca Shimadzu, operando com um tubo de Raios X, com filamento de Ródio (Rh) a 4 KW, e 40 kV, para analisar as amostras coletadas em campo.

Os detectores presentes no equipamento utilizados são Contador de Frequência proporcional (FPC-Proportional counter), podendo detectar elementos entre o Berílio (Be) e o Cálcio (Ca). O segundo detector é o Contador Cintilômetro (SC-Scintillation counter), o qual tem a capacidade de detecção os elementos entre o Escândio (Sc) e o Lutécio (Lu). Eles trabalham em conjunto com os cristais analisadores, cada cristal analisa uma quantidade de elementos. O cristal TAP, tem a capacidade de analisar os elementos entre o Oxigênio (O) e Manganês (Mn), O PET, analisa o Alumínio (Al) e o Silício (Si). O terceiro cristal é o Ge, analisando os elementos de Fósforo (P) a Argônio (Ar), e por fim o LIF, analisando a maior quantidade de elementos, estando eles entre o Potássio (K) e Urânio (U) [48].

Capítulo 3

Metodologia

3.1.METODOLOGIA

3.2. OBTENÇÃO DAS IMAGENS DE SATÉLITE

Para obtenção das imagens de satélite é importante definir as localizações de estudo, elas foram selecionadas pela empresa parceira Invento Geosoluções. A partir disso é possível obter as imagens dos satélites Landsat-8 e Sentinel-2 para registrar as regiões de estudo. Para cada satélite foram selecionadas imagens com pouca vegetação para maximizar a análise da superfície. Essas imagens foram adquiridas no site *EarthExplorer* da USGS [49]. Na primeira etapa da pesquisa foram adicionados arquivos que demarcavam as regiões de análise para ter acesso apenas às imagens correspondentes. Além disso, foi adicionado o critério de porcentagem de nuvens em 10% para simplificar ainda mais as buscas.

Na aba conjunto de dados, foi selecionado o satélite desejado. Nesse caso, as escolhas foram feitas individualmente, mas há a possibilidade de selecionar vários ao mesmo tempo. O Landsat foi o primeiro selecionado, em que as imagens referentes à data de 05 de dezembro de 2017 (Figura 13a) para região de Canindé do São Francisco e a data 26 de outubro de 2020 (Figura 13b) para a região de Gararu. Já as imagens do Sentinel-2 foram obtidas em 28 de outubro de 2018 para região de Canindé do São Francisco (Figura 14a) e em 19 de fevereiro de 2021 para região de Gararu (Figura 14b). Todas as imagens apresentam baixa cobertura de vegetação, o que é desejável para a análise. Além disso, praticamente não há nuvens na região, o que também é benéfico para a análise, pois permite uma visão desobstruída da área. Isso garante que a análise seja precisa e não seja afetada por elementos externos.

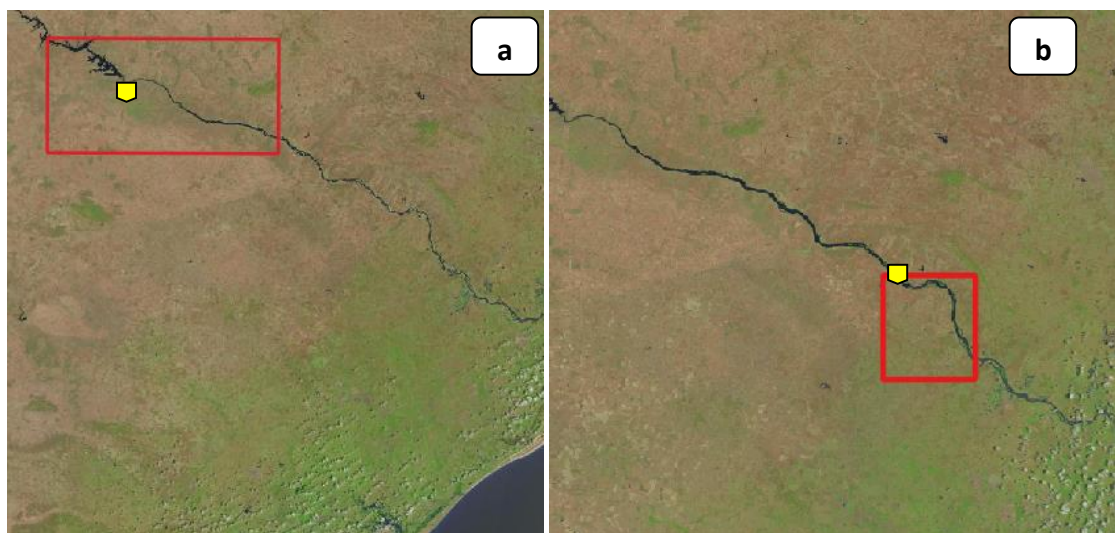


Figura 13: Imagens do Landsat-8 com as regiões de a) Canindé do São Francisco/SE, com a cidade de Canindé indicada pelo marcador amarelo e b) Gararu/SE, com a cidade de Gararu indicada pelo marcador amarelo [49].

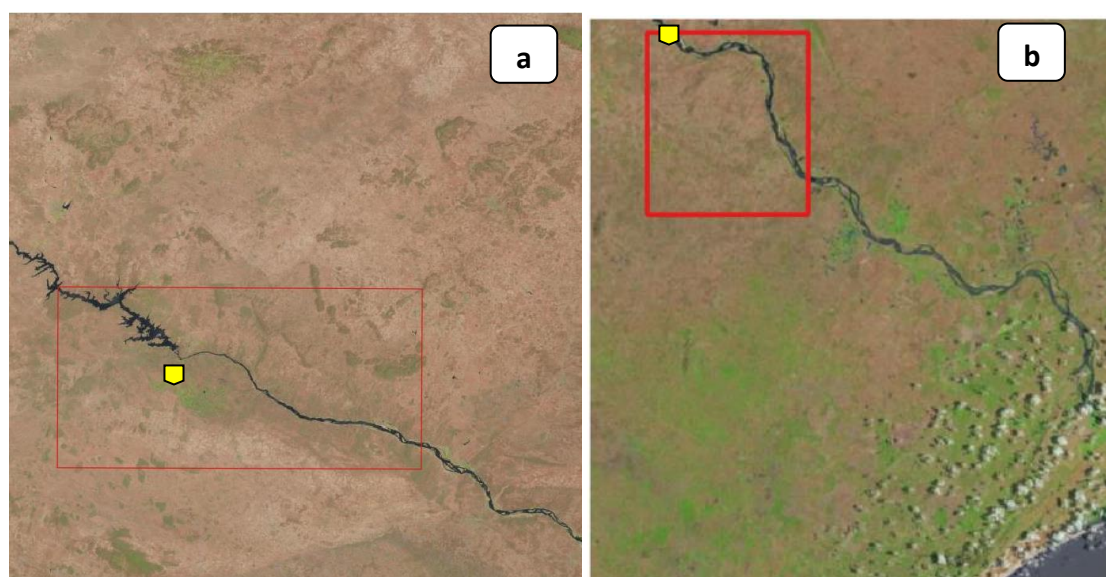


Figura 14: Imagens para a) Região de Canindé do São Francisco/SE, com a cidade de Canindé indicada pelo marcador amarelo e b) Região de Gararu/SE obtidas do satélite Sentinel-2, com a cidade de Gararu indicada pelo marcador amarelo [49].

É importante mencionar que a disponibilidade dessas imagens mudou recentemente. Elas foram originalmente disponibilizadas no site EarthExplorer do USGS, mas esses dados foram removidos em 18 de novembro de 2022 [50]. A partir desse dia, as imagens do Sentinel-2 estão disponíveis no site Copernicus Open Access Hub [51].

Para complementar as informações dos locais de análise, foram coletados os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) (Figuras 15 e 16) que

representam a altitude da topografia local [52]. Eles têm como objetivo identificar pontos elevados, de difícil acesso, locais inviáveis para visitas a campo e áreas com níveis de sombreamento. Os MDEs foram obtidos do site ASF Alaska da EarthData [53], pertencente à NASA, usando o satélite Alos Palsar, que operou entre 2006 e 2011 e possuía um radar de abertura sintética. Essa tecnologia permite uma análise mais precisa e detalhada da topografia da área de estudo, fornecendo informações valiosas para a análise.

As Figuras 15 e 16 mostram a representação gráfica dos pontos elevados destacados em vermelho, com cerca de 632 metros acima do nível do mar para a região de Canindé de São Francisco e 355 metros para a região de Gararu. Além disso, é possível observar pontos com baixa altitude, como o Rio São Francisco, destacados em azul. Essa representação permite uma visualização clara e fácil de compreender da topografia da área, facilitando a identificação de pontos de difícil acesso e áreas com níveis de sombreamento.

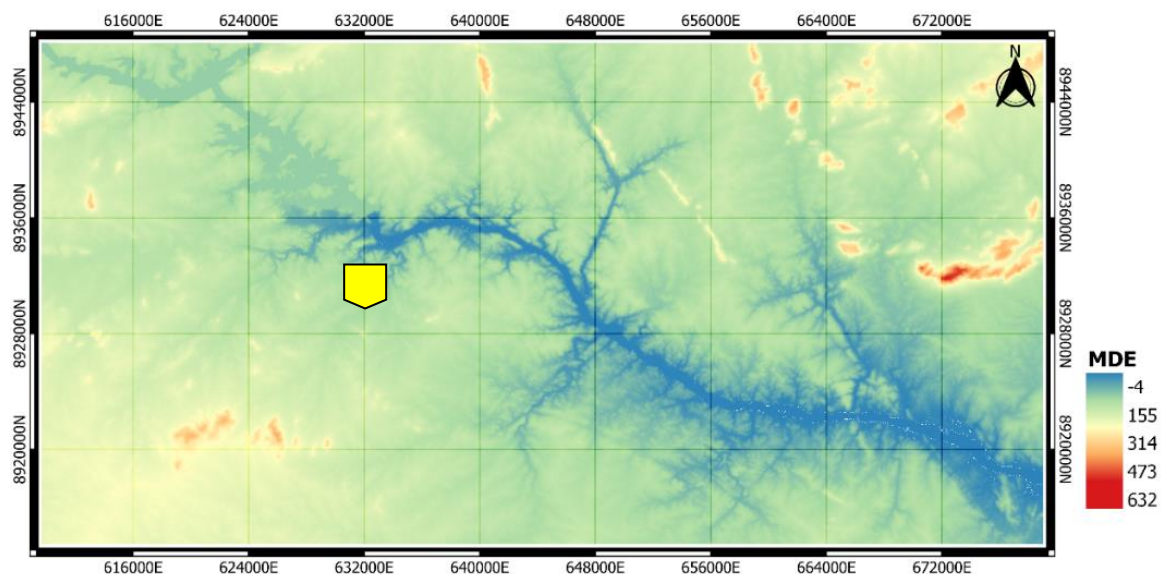


Figura 15: MDE da região de Canindé de São Francisco/SE, da data de 19/02/2011, a cidade de Canindé está indicada com o marcador amarelo [53].

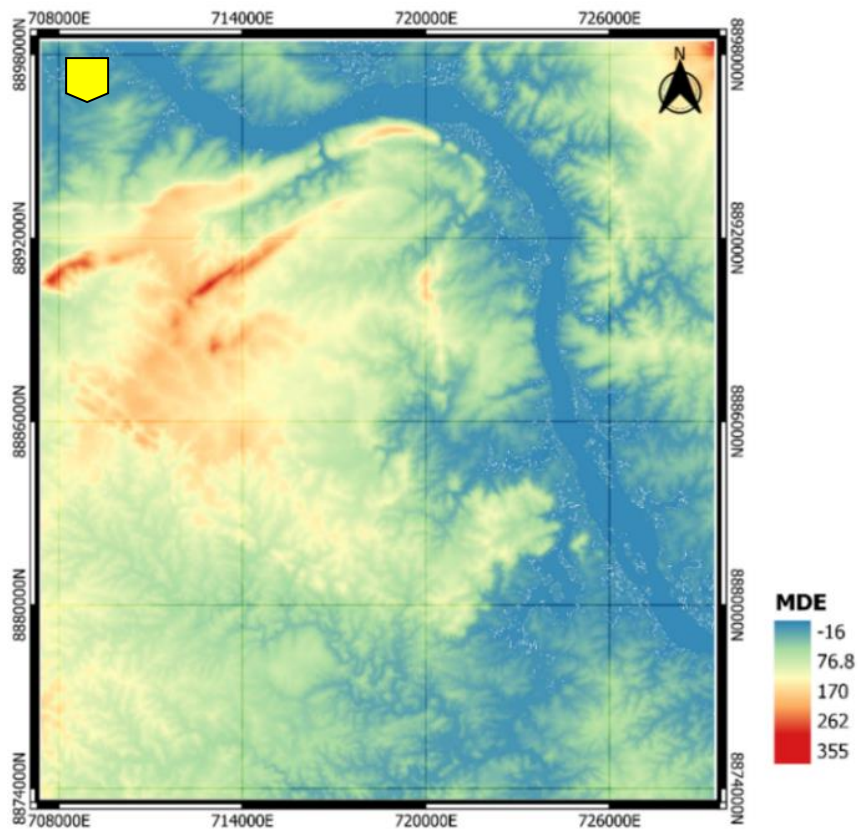


Figura 16: MDE da região de Gararu/SE, da data de 02/02/2011, a cidade de Gararu está indicada com o marcador amarelo [53].

3.3. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM

É importante notar que para se trabalhar com imagens obtidas por meio de sensores, torna-se necessário realizar o seu processamento [23]. Esse processamento inclui etapas como correção radiométrica [54], georreferenciamento [55], entre outras. No entanto, existem plataformas que disponibilizam imagens já processadas, permitindo que os usuários escolham entre obter as imagens tratadas ou realizar os processamentos por conta própria. Isso pode ser uma boa opção para aqueles que não possuem experiência ou recursos para realizar esses processamentos, já que as imagens já processadas geralmente apresentam qualidade superior e são mais fáceis de utilizar. Mas, é preciso ter conhecimento sobre todos os processamentos aplicados antes da utilização das informações.

3.4. GEORREFERENCIAMENTO

Ao adquirir uma imagem de satélite ou de qualquer outra plataforma de transporte, é fundamental observar se ela indica a devida referência espacial. Isso é importante para que a imagem possa ser georreferenciada e, assim, ser sobreposta a outras imagens ou mapas com precisão [55]. Quando uma imagem tem essa referência é chamada de "Imagem georreferenciada". Caso contrário, é necessário realizar o georreferenciamento para que ela possa ser localizada corretamente [1,56].

O processo de georreferenciamento é fundamental para garantir a precisão da posição, tamanho e forma da imagem quando sobreposta a qualquer mapa terrestre. Existem ferramentas computacionais e softwares que fazem esse georreferenciamento de forma automatizada, usando sistemas de coordenadas esféricas ou geodésicos, que descrevem matematicamente a Terra como uma superfície tridimensional [55,57]. Isso permite a localização do alvo por meio de latitude e longitude. Essas referências são denominadas como Sistema de Referência Global (SRG) ou Global Positioning system (GPS) e, no caso do Brasil, é utilizado o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS) do ano 2000, com a denominação final de SIRGAS 2000 [55].

A referência espacial é essencial para garantir a precisão das imagens de satélite e outras plataformas de transporte. Existem ferramentas disponíveis para realizar o georreferenciamento de forma automatizada e é importante estar atento a essa referência antes de usar essas imagens para qualquer finalidade.

3.5. ELIMINAÇÃO DE RUÍDO

A eliminação de ruído é um processo utilizado para remover ou reduzir a quantidade de ruído presente em uma imagem ou sinal. As imagens obtidas podem conter ruídos devido a vários fatores, como a sensibilidade do sensor, a exposição da imagem ou a qualidade do sinal [1,17,58]. Existem vários métodos e algoritmos diferentes que podem ser usados para eliminar o ruído, cada um com suas próprias vantagens e desvantagens [1]. Alguns métodos populares incluem filtragem, suavização e redução de ruído estatístico [23].

A correção radiométrica também é importante, pois ajuda a corrigir as diferenças entre os tons de cinza, aumentando a clareza da imagem. A correção radiométrica é um processo que visa corrigir as diferenças na exposição e na sensibilidade do sensor, ajudando a equilibrar as cores e os níveis de brilho da imagem [17]. Isso é importante para garantir que a imagem seja precisa e consistente, independentemente de como foi obtida [59].

3.6. CORREÇÃO ATMOSFÉRICA

Como já mencionado anteriormente, a REM antes de chegar à superfície sofre uma série de interações com as partículas presentes na atmosfera, gerando efeitos indesejáveis nas imagens finais. Para reduzir esses efeitos sobre os níveis de cinza da imagem, é utilizada a técnica de correção atmosférica. Ela tem como base a suposição de que os efeitos atmosféricos adicionam características às imagens, e a correção age sobre esse sinal adicionado, fazendo a devida subtração em todas as bandas selecionadas [1,15,17,59].

Existem diversas técnicas de correção atmosférica, variando para cada satélite ou para o nível de informações que possuem sobre data de captura das informações, hora, tipo de terreno e outras informações. Algumas técnicas são LaSRC (Landsat Surface Reflectance Code), DOS (Dark Object Subtraction) e Sen2Cor (Sentinel-2 Correction) [60].

3.6.1. LaSRC – Landsat Surface Reflectance Code

O LaSRC (Landsat Surface Reflectance Code) é uma técnica de correção atmosférica desenvolvida especificamente para dados do sensor multiespectral OLI, utilizado no satélite Landsat-8, operado pela NASA e GSFC (Goddard Space Flight Center). O LaSRC se baseia em princípios físicos para calcular a reflectância de superfície e a temperatura de brilho a partir das informações contidas nos metadados da imagem, juntamente com parâmetros auxiliares como o MDE (Modelo Digital de Elevação) para o cálculo da pressão atmosférica. Como é desenvolvido utilizando a linguagem FORTRAN, é necessário ter conhecimento em programação para utilizá-lo [60].

3.6.2. DOS – Dark Object Subtraction

A técnica de correção atmosférica DOS (Dark Object Subtraction) utiliza a resposta espectral de alvos escuros presentes na imagem. A suposição é que esses alvos têm uma radiância detectada igual a zero em todos os comprimentos de onda. Qualquer valor diferente de zero é atribuído a efeitos de espalhamento atmosférico e é subtraído. A técnica DOS não corrige os efeitos aditivos da atmosfera, mas é eficaz para corrigir problemas relacionados a efeitos de espalhamento atmosférico e na correção de efeitos causados por neblina [1,23,59,60].

3.6.3. Sen2Cor – Sentinel-2 Correction

o Sen2Cor (Sentinel-2 Correction) é um método híbrido desenvolvido para ser utilizado em imagens multiespectrais obtidas pelo sensor MSI (Multispectral Instrument) a bordo do satélite Sentinel-2. O Sen2Cor converte valores do topo da atmosfera em valores de reflectância de superfície. A correção utiliza informações extraídas dos metadados das imagens e dos valores de reflectância de alvos na imagem para determinar alguns parâmetros atmosféricos, que são designados de acordo com a localização e condições climáticas no momento da radiância [60].

3.7. OPERAÇÕES ARITMÉTICAS COM AS IMAGENS

As imagens são compostas por uma série de bandas espectrais que apresentam uma determinada faixa de comprimento de onda. utilizando processos aritméticos como soma e subtração sobre essas bandas, é possível obter resultados significativos. As vantagens na utilização desse processo incluem a sua velocidade de aplicação, a diminuição do ruído, a diminuição da quantidade de imagens e a obtenção de realce para alvos e regiões de interesse. Ele trabalha com a combinação de imagens, gerando uma nova imagem distinta das utilizadas. A transformação é feita pixel a pixel, por meio de regras matemáticas envolvendo, no mínimo, duas bandas do mesmo sensor ou de datas diferentes, como mostra a Figura 17 [1,23]. As operações que apresentam maior uso no processamento de imagens são a divisão e subtração, enquanto que a soma e a multiplicação apresentam menos aplicações.

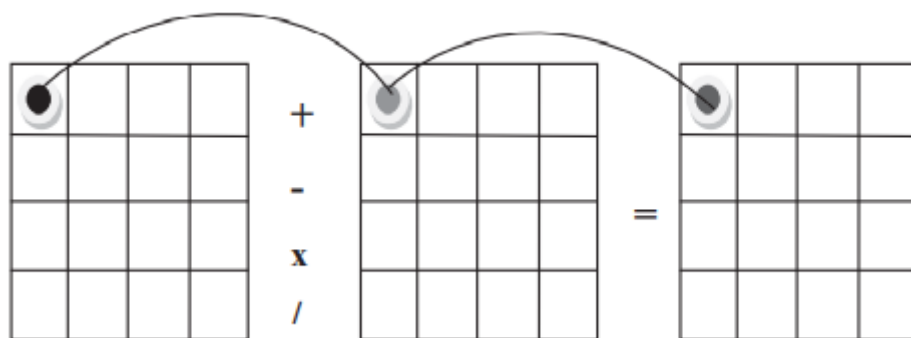


Figura 17: As operações aritméticas causam transformações pixel a pixel nas bandas, gerando uma nova imagem [1].

3.7.1. Soma

A soma tem como objetivo destacar alvos comuns entre imagens de bandas espectrais diferentes ou de diferentes datas, permitindo o trabalho com duas ou mais imagens. A nova imagem (I_{soma}) é o resultado de uma média aritmética dos pixels das imagens que deram origem a ela (I_i) [1,23], como mostrado na equação 2:

$$I_{soma} = int \frac{(I_1 + I_n)}{n}, \quad (2)$$

em que n , é o número de bandas e o termo *int* inserido para obter como resultado final um valor inteiro [1].

A soma é dividida por n para normalizar os valores obtidos, já que eles ultrapassam o máximo dos valores digitais da imagem. Essa operação também resulta na diminuição do ruído da imagem, levando em consideração que a soma de pixels que possuem ruído com pixels que não possuem tende a diminuir o impacto do ruído [1,23].

3.7.2. Multiplicação

Ao se utilizar a multiplicação os valores gerados ultrapassam o limite da imagem, por isso é necessário um reescalonamento para que os valores voltem para o limite adequado, o que pode causar uma perda de informações. Essa operação tem como objetivo realçar alvos semelhantes entre as imagens,

e é representa de acordo com a equação 3 e normalmente é aplicada para o produto de duas bandas [1,23].

$$I_{Prod} = int \frac{(I_1 \times I_n)}{k - l}, \quad (3)$$

$k - l$ é o valor limite para tons de cinza da imagem, caso esteja trabalhando com uma imagem de 8 bits, $k - l = 255$ [1].

3.7.3. Subtração

A subtração é o processo muito utilizado para detecção de impactos ambientais e variações temporais de um determinado local. Para esse processo são utilizadas duas imagens da mesma banda espectral, mas com datas diferentes do mesmo sensor de preferência, para evitar uma série de processos adicionais [1,23].

Supondo uma imagem de 8 bits, com valor máximo de 255, ao fazer a operação o resultado poderá dar dois valores máximos para os pixels, um máximo negativo (-255) e outro positivo (+255). Como não existe radiância de energia negativa, valores negativos não são aceitos, por esse motivo é adicionado o número máximo que a imagem suporta a equação, causando o deslocamento dos valores negativos para a parte positiva. Essa manipulação causa uma extrapolação dos valores positivos, para compensar e reescalonar esses novos valores dentro do limite é feita a divisão por dois, equação 4 [1,23].

$$I_{Sub} = int \frac{(I_1 - I_2) + 255}{2}. \quad [1] \quad (4)$$

Após a aplicação da fórmula e a obtenção da nova imagem, os números digitais de cada pixel terão um significado. Continuando a usar uma imagem de 8 bits, o número digital central (128) representa pixels que não sofreram mudanças após o processo, valores deslocados para direção de 0 indicam mudanças de alvos mais claros, e os pixels que se deslocaram para direção do

255 indicam mudança dos alvos mais escuros, podendo identificar mudanças brandas e extremas, como mostrado na Figura 18 [1,23].

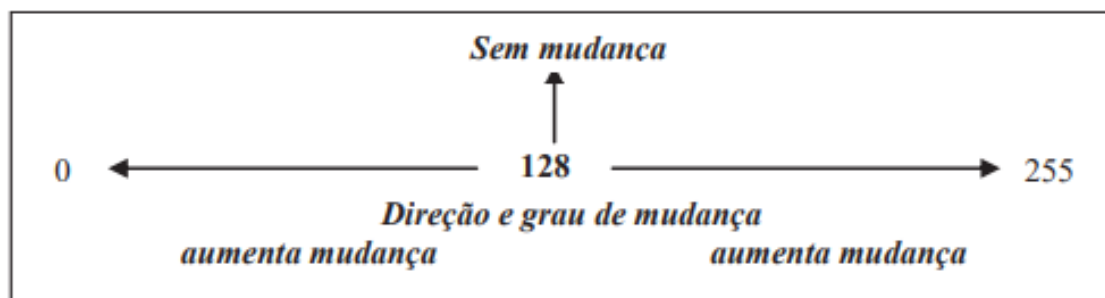


Figura 18: Distribuição dos pixels após o processo de subtração entre as bandas espectrais [1].

3.7.4. Divisão (Razão de Bandas)

A divisão de bandas ou razão de bandas é uma das técnicas mais utilizadas no sensoriamento remoto. Ela tem a capacidade de distinguir pequenas variações de reflectância de alvos específicos, como solos ou tipos de vegetação [1,23]. Antes de aplicar essa técnica, é importante verificar se as regiões de estudo ou alvos apresentam algum tipo de relevo ou se são planos, identificando regiões com possível sombras que podem alterar os níveis de reflectância e gerar interferência nos resultados [1,23].

Para utilizar essa técnica, é preciso seguir uma regra básica que implica escolher bandas com diferentes valores de números digitais para os alvos a serem destacados. É preciso ter uma diferença significativa entre os valores nas bandas utilizadas [1,23]. Quanto maior a diferença, melhor o resultado final. Ou seja, é preciso identificar a banda em que o alvo de interesse apresenta maior reflectância, em seguida identificar a banda que apresenta maior absorção para o mesmo e inserir na equação 5 [1].

$$I_{div} = a \frac{I_1}{I_2} + b, \quad (5)$$

em que a e b são parâmetros calculados de forma automática pelo software utilizado [1].

Como o resultado da divisão dos pixels é geralmente muito pequeno, é preciso um valor (a) para expandi-los e realocá-los no intervalo suportado pela

imagem. O valor de b é adicionado para causar um deslocamento centralizando os dados dentro do intervalo suportado. A Figura 19 ilustra a divisão entre as bandas e a Tabela 3 mostra o realce de quatro alvos por meio dos valores numéricos dos pixels [1].

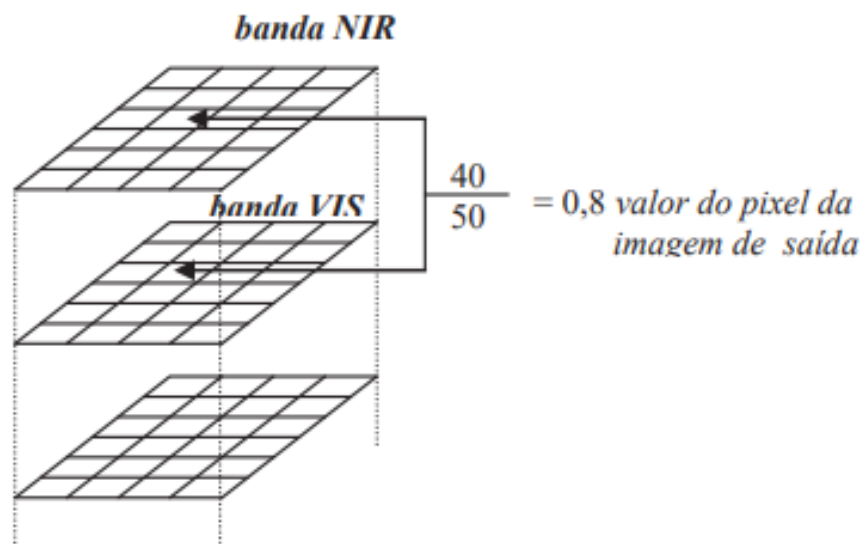


Figura 19: Divisão entre duas bandas espectrais [1].

Tabela 3: Demonstração da operação de divisão entre duas bandas espectrais [1].

bandas alvos	1	2	2/1	$a=15$ $b=7$
A	8	43	5,4	88
B	6	40	6,6	106
C	5	38	7,6	121
D	13	24	1,8	34

3.8. ÍNDICE DE VEGETAÇÃO

Índices de vegetação são medidas radiométricas que combinam bandas espectrais com o objetivo de indicar a abundância, porcentagem de cobertura verde, vigor e outras propriedades da vegetação [1,15,61,62]. Para uma melhor análise da vegetação em determinadas áreas de estudo, é utilizado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que é calculado através das diferenças de reflectância entre as bandas do vermelho (RED), que apresenta baixa reflectância, e a banda do infravermelho próximo (NIR), a qual apresenta uma reflectância muito maior em comparação com as bandas do visível [1,63,64].

Esse método pode ser aplicado por meio de softwares que permitem a manipulação de bandas espectrais das imagens, como o software livre QGIS. Para isso, basta utilizar a equação 6.

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (6)$$

A aplicação do NDVI resultará em uma única imagem que apresentará valores entre -1 a 1 [1,61,64]. Valores abaixo de zero representam locais sem vegetação, podendo ter a presença de água, gelo, neve, nuvem e áreas áridas. Para valores positivos, quanto mais próximo de 1, maior a quantidade de vegetação. Regiões que apresentarem valores entre 0,2 e 0,3 indicam a presença de pastagem ou arbustos. Já locais com valores entre 0,4 e 0,9 indicam a presença de florestas e vegetação densa [61].

3.9. COMPOSIÇÕES PARA IDENTIFICAÇÃO DE MINÉRIO

Para que seja feita a detecção de determinados minerais aflorantes na subsuperfície existem diversas composições específicas, a qual utiliza de razões de bandas. Cada razão destacará um conjunto de minerais, e após o agrupamento de até 3 razões é possível obter uma imagem com novas cores para cada elemento. Isso irá facilitar a identificação de regiões com maior abundância. Algumas composições disponibilizadas são a razão de Sabins que utiliza o sistema de composições coloridas RGB, aplicando no canal R a razão 5/7 [65-67], no canal G a 3/1 [67,68] e no B a 3/5 [66] para o sensor ETM+, presente no Landsat-7, a de Abrams que usa R 5/7 [65-67], G 3/2 [66] e B 4/5 [66,67], a de Kaufmann R 7/4 [66], G 4/3 [66,67] e B 5/7 [65-67] e a de Chica-Olma R 5/7 [65-67], G 5/4 [66,69,70] e B 3/1 [66-68,70] para o mesmo sensor. Nesse caso, para utilizar alguma dessas composições com imagens de outro satélite, é necessário que os comprimentos das bandas espectrais sejam comparados aplicando o que estiver dentro da mesma faixa, um exemplo é a composição de Chica-Olma, a qual para o sensor OLI do Landsat-8 ficaria sendo R 6/7 [66,68,69,71,72], G 6/5 [71,72] e B 4/2 [65,68,69,71,72], Sabins também possui uma composição utilizando as mesmas bandas, mas em ordem inversa, apresentando cores diferentes para os minérios.

As operações exigem que as bandas de maior reflectância e maior absorção sejam selecionadas. Os minerais apresentam características que tornam possível essa identificação. Por exemplo, os minerais de argila como illita e caulinita, exibem características de reflectância e absorção em determinados comprimentos de ondas que são $1.55-1.75\mu m$ e $2.1-2,4\mu m$ respectivamente. As bandas para o Landsat-8 que apresentam essas faixas espectrais são as bandas 6, a qual exhibe alta reflectância para esses minerais, e a banda 7 contendo alta absorção para os mesmos [64,69,71,73]. Utilizando esses comprimentos de onda e a razão entre as bandas, o resultado esperado é a criação de uma nova imagem com os alvos de argila destacados.

3.10. DADOS AEROMAGNETOMÉTRICO

Os dados aeromagnetométricos foram adquiridos com altitude de voo de 150 m entre os anos de 1971 e 2001. Nos anos seguintes, houve alterações na altitude, chegando a 100 m, e nas distâncias entre as linhas de voo, que passaram de cerca de 2000 m para 500 m. Esses levantamentos foram realizados por meio de três projetos: o primeiro, denominado Baixo São Francisco, em 1978; o segundo, Paulo Afonso e Teotônio Vilela, em 2011; e o terceiro, Estado de Sergipe, também em 2011. Todos realizados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) [74].

A técnica de magnetometria é amplamente utilizada na exploração mineral, especialmente para minerais metálicos, através da obtenção de informações sobre o campo magnético terrestre, produzido por um momento de dipolo localizado no centro da terra [74].

É importante está ciente que quando se usa dados magnetométricos, o campo magnético terrestre é removido, ficando apenas resíduos, que podem ser usados para estudar anomalias magnéticas. Para mapeamento, são usadas fontes mais rasas e para destacar essas fontes é aplicada a primeira derivada vertical da anomalia magnetométrica [74].

3.11. SOFTWARE PARA ANÁLISE DAS IMAGENS

O Software utilizado neste trabalho foi o QGIS, um sistema de informação geográfica de código aberto que possui suporte em diversos Sistemas operacionais e suporta inúmeros formatos de vetores, rasters, bases

de dados e possui diversas funcionalidades, permitindo que o usuário visualize, edite, crie mapas, assim como analisar dados [75].

Capítulo 4

Área de estudo

4.1. ÁREA DE ESTUDO

Foram selecionadas duas regiões no alto sertão sergipano para estudo (Figura 20): a primeira é à região de Canindé do São Francisco, com uma área total de aproximadamente 2450 Km² ficando a 213 Km de Aracaju, servindo como a região de controle, que já possui uma grande quantidade de informações disponíveis. A segunda, abrange regiões próximas a Gararu, com uma área aproximada de 550 Km² e distância da capital de 161 Km. Essas duas áreas foram selecionadas pela empresa parceira INVENTO GEOSOLUÇÕES LTDA [76] por apresentarem características geológicas que possibilitam a presença de minerais metálicos.

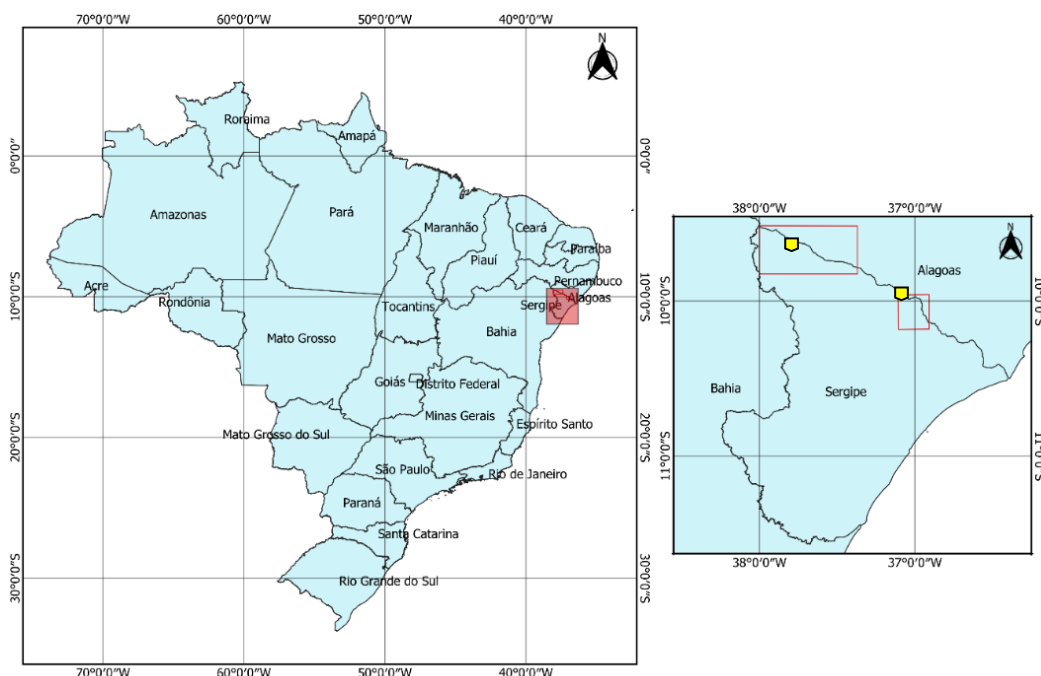


Figura 20: Mapa do Brasil, e em destaque o Estado de Sergipe com as regiões de estudo selecionadas para este trabalho, e as cidades de Canindé e Gararu com os sinalizadores em amarelo [77].

4.2. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

O Estado de Sergipe está situado sobre três províncias estruturais: a Província São Francisco, a Província Borborema e a Província Costeira e Margem Continental (Figura 21) [74,78]. As duas últimas estão dentro das regiões de estudo selecionadas. A Província Borborema ocupa boa parte da região nordeste do Brasil e é caracterizada pela presença de plutonismo granítico e zonas de cisalhamento transcorrentes. A Província Costeira e

Margem Continental é formada pelas bacias sedimentares costeiras mesocenozóicas, e extensões submersas na margem continental [78].

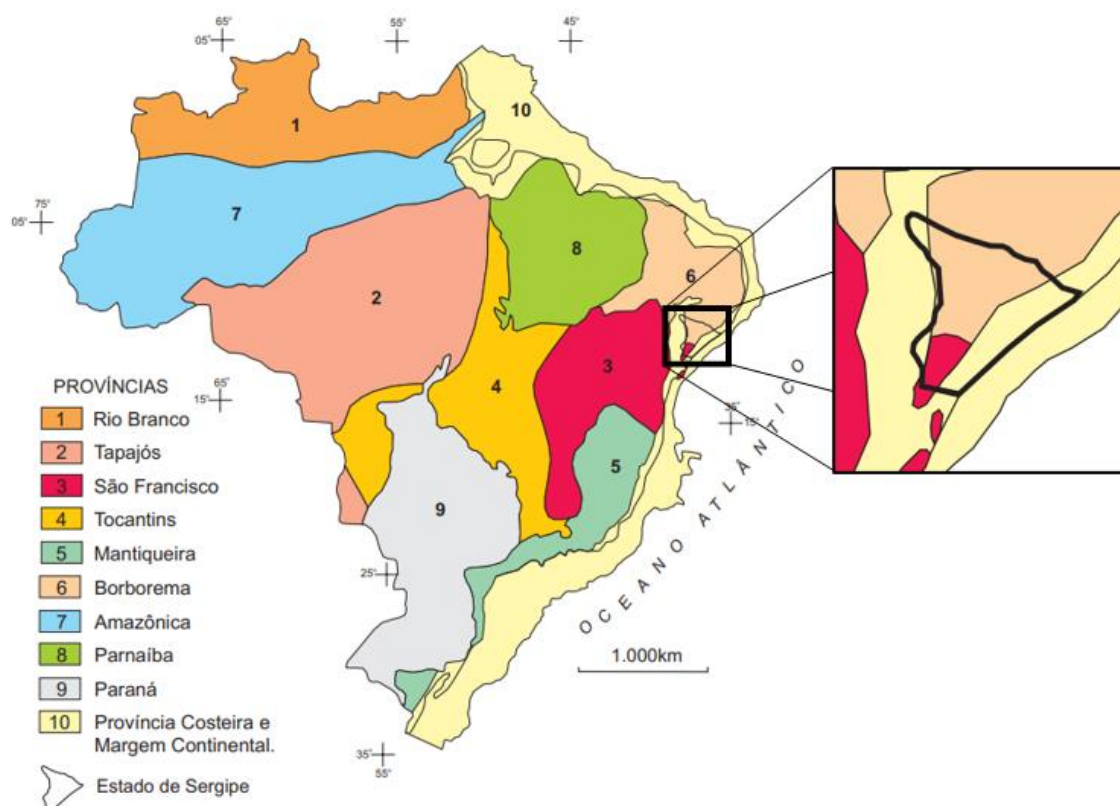


Figura 21: Mapa do Brasil com as Províncias demarcadas, com destaque no Estado de Sergipe [78].

Logo, o Estado pode ser subdividido quase completamente por domínios cartografados (Figura 22). De acordo com as movimentações tectônicas, diferentes níveis crustais podem ser representados, com os domínios mais profundos localizados mais a norte. Dentre todos os domínios, os que se encaixam na região de estudo são os Domínio Canindé, o Domínio Poço Redondo e o Domínio Macururé [74,78].

O Domínio Canindé é constituído por uma faixa que se estende de noroeste a sudeste paralelo ao Rio São Francisco e é limitado na região sul pelo Domínio Poço Redondo. Essa região conta com a presença de uma zona de cisalhamento dúctil contracional, a qual apresenta deslocamentos devido falhas transcorrentes sinistrais transversais com direção de nordeste a sudoeste. Ela apresenta alinhamentos estruturais, zonas de cisalhamento e falhas de cisalhamento sinistral, sendo constituído por rochas metavulcano-

sedimentares do Complexo Canindé, o qual agrega rochas metavulcânicas e metassedimentares [78].

O Domínio Poço Redondo é formado pelo complexo migmatítico ocorrendo em forma de lajedos, e por intrusões de granitoides. Ele é limitado tanto no Norte quanto Sul por zonas de cisalhamento e apresenta uma série de contatos definidos. Ele também apresenta zonas de cisalhamentos transcorrentes sinistrais [78].

O Domínio Macururé é marcado pela presença de Stocks de granitoides intrusivo e é limitado pelo domínio Vaza Barris a sul. Ele apresenta áreas com a indicação de gabro, quartzito, granitoides e locais que predomina rochas metasedimentares. Apresenta uma série de zonas de cisalhamento contracional e algumas áreas de contato definido [78].

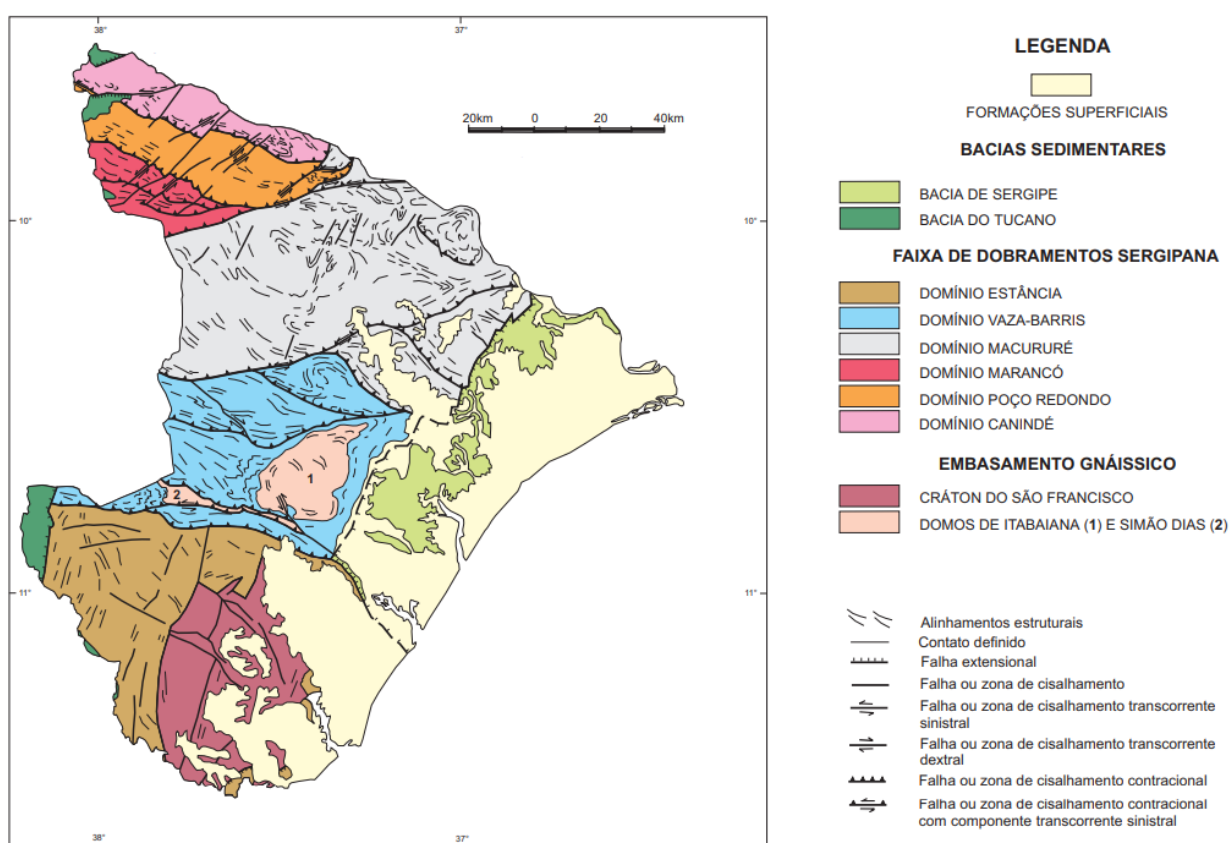


Figura 22: Mapa de Sergipe com as separações dos domínios e demais características presentes neles [78].

4.3. RECURSOS MINERAIS

O Estado de Sergipe possui uma ampla variedade de minerais, o que permite a realização de muitos estudos e aumenta as oportunidades de investimento no estado. Os minerais encontrados são comumente divididos em quatro categorias: calcários, metálicos, não-metálicos e energéticos e sais solúveis, com mais de 200 jazimentos registrados [78]. Na Figura 23 os elementos estão destacados com a cor verde. Entre eles estão o chumbo (Pb), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), ouro (Au), titânio (Ti), tório/terras raras (Th). Os pontos marrons são os minerais não metálicos, como água mineral (agm), amianto (am), argila (ag), granito (gr) quartzito (qt) e outros. Na cor azul, encontram-se os calcários, como mármore (mm), calcário dolomítico (cd), calcário (ca), calcário calcítico (cc) e dolomito (dl). Em amarelo, estão representadas as substâncias minerais voltadas sais solúveis e substâncias energéticas, como, gás (gs), petróleo (pe), potássio (K) e sódio (Na) [78].

Dentre as classes apresentadas, a que apresenta maior interesse para a atual pesquisa é a dos minerais metálicos. Sergipe não é destaque referente ao uso de minerais metálicos para produção mineral, mas existe a possibilidade de que a extração de minas, mesmo que de pequeno porte seja viável economicamente [78].

Dentre todos os minerais metálicos, de acordo com o mapa geológico de Sergipe, o cobre e o níquel estão relacionados com os domínios Canindé e Macururé, podendo aparecer separados ou de forma associada. Eles se hospedam nas rochas de gabro e gabro-noritos, presentes no domínio Canindé. Assim como podem ser encontrados em rochas que se hospedam em xistos e quartzitos encontrados no domínio Macururé, podendo chegar a profundidades que podem passar de 150 m. Também é possível citar o chumbo associado ao zinco, relacionados com ocorrências sedimentares de subsuperfície e podem ocorrer também associadas a mármore do Grupo Macururé. O ferro também é outro minério presente nas regiões próximas a Canindé do São Francisco, ligados a rochas gabróicas, assim como outros minérios, alguns desses minérios são magnetita, ilmenita e hematita [78].

4.4. CARACTERÍSTICAS DO MINÉRIO DE FERRO

O planeta apresenta em sua composição uma grande quantidade de ferro, com a maioria presente no núcleo, enquanto o restante está distribuído pela superfície [79]. O minério de ferro é muito importante para o desenvolvimento industrial de um país, pois o minério é utilizado para a produção de aço e diversas outras aplicações [79,80]. Assim como economicamente, pois a exportação tanto do minério quanto dos produtos fabricados, permitem que ocorra a entrada de capital no país [79].

No mundo existem depósitos importantes com minério de ferro, eles são denominados de Formações Ferríferas Bandadas (FFBs), essas formações são rochas de origem sedimentar bandadas ou laminadas, contendo espessura variável de milímetros até poucos centímetros. Essas rochas podem conter mais de 15% de ferro e, devido a alterações hidrotermais, podem ultrapassar os 60%. Os depósitos que apresentam uma porcentagem tão elevada são conhecidos como depósitos de alto teor. Para que ocorra uma FFB é necessário que ocorram interações entre diversos fatores biológicos,

tectônicos, magmáticos e geoquímicos. Essa deposição ocorreu há bilhões de anos, nos eventos chamados de Grande Evento de Oxigenação (GOE, Great Oxygenation Event) e Evento Neoproterozoico de Oxigenação (NOE, Neoproterozoic Oxygenation Event), conforme mostrado na Figura 24 [79,81].

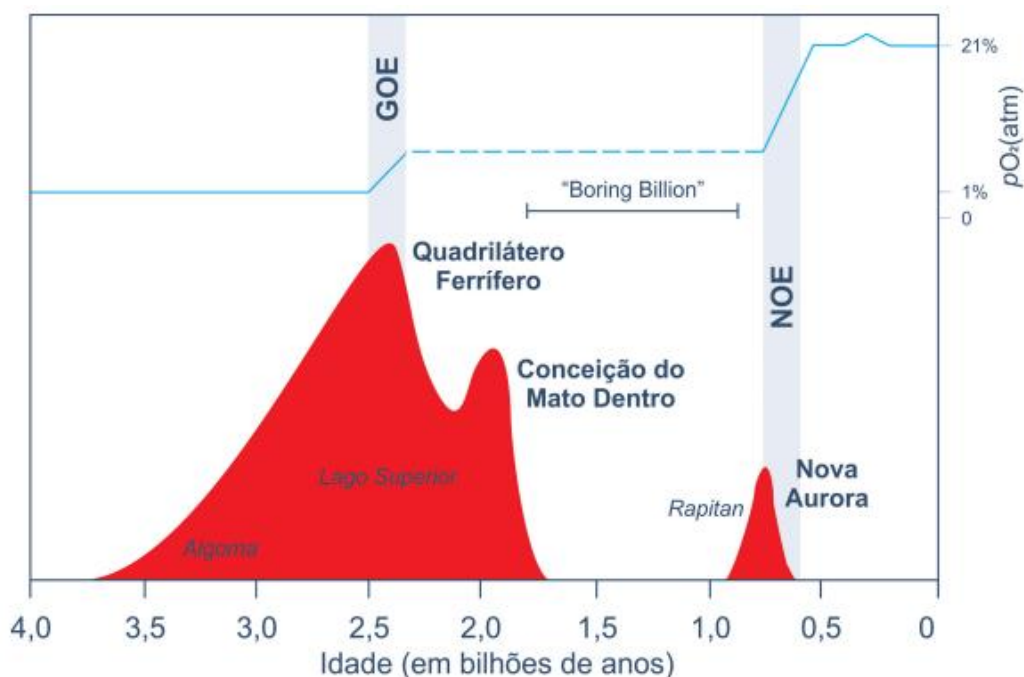


Figura 24: Deposições de FFBS [79].

O Brasil é um dos países com uma reserva considerável de ferro, estando entre os maiores exportadores do minério, possuindo cerca de 13% das reservas mundiais. Destacam-se as minas presentes em Minas Gerais (Figura 25) [79,81]. O ferro na natureza está presente em vários minerais, sendo os óxidos os que ganham destaque, pois indicam uma porcentagem significativa de ferro na sua composição. As formas primárias são Magnetita (Fe_3O_4) e Hematita (Fe_2O_3), mas também podem aparecer como hidróxidos, carbonatos e silicatos [79].

Os óxidos são caracterizados por combinações de oxigênio com um ou mais metais, e apresentam características como dureza e densidade alta. Eles ocorrem em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. Os três minerais de ferro mais citados são a magnetita (Fe_3O_4), hematita (Fe_2O_3) e goethita ($FeO(OH)$) [79,82,83].

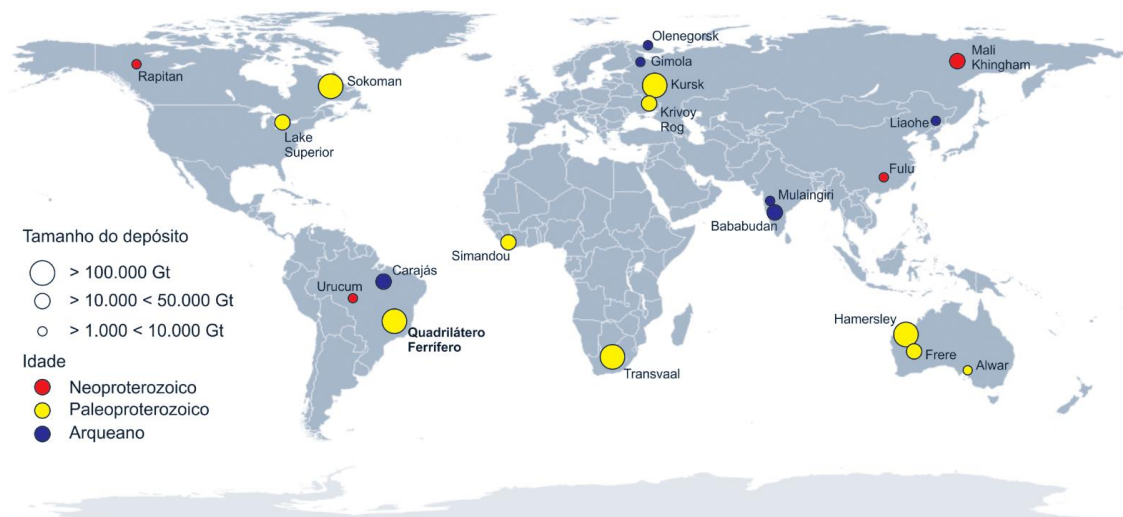


Figura 25: Fontes de depósito de Ferro espalhadas pelo mundo [79,81].

4.4.1. Magnetita

Um dos principais minerais de ferro é geralmente encontrada em rochas ígneas e sedimentares. Ele apresenta uma cor preta, brilho metálico e transparência opaca. Sua fórmula química é (Fe_3O_4) [82-84] e cerca de 72% de sua composição é ferro. Ele possui forte magnetismo, deixa um traço preto, tem dureza 6 e densidade $5,18 \text{ g/cm}^3$. Sua susceptibilidade magnética está entre $7 \times 10^4 - 2 \times 10^7$. A estrutura cristalográfica é cúbica com parâmetros de rede $a = b = c = 8,40 \text{ \AA}$ (Figura 26) [82-84].

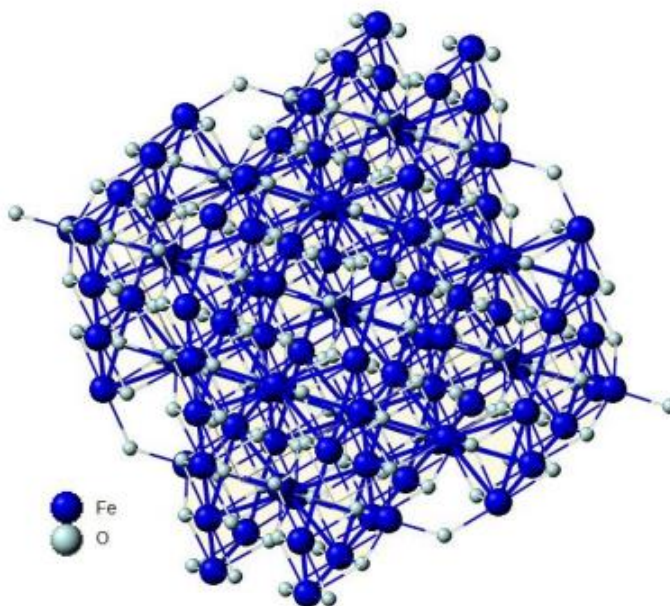


Figura 26: Estrutura cristalina da magnetita [82].

4.4.2. Hematita

A hematita é um mineral que pode ser encontrado na natureza nas cores pretas ou vermelho sangue, com brilho metálico e uma transparência opaca. Sua fórmula química é (Fe_2O_3) e possui cerca de 70% de ferro em sua composição, acompanhados por oxigénios [79,84]. Algumas de suas características que facilitam a identificação são o traço vermelho sangue, a sua dureza variando entre 5,5 – 6,5, densidade de $5,26 \text{ g/cm}^3$ [79], susceptibilidade magnética variando entre $(0,42 - 3,80) \times 10^4$ e estrutura cristalográfica hexagonal [82] com parâmetros de rede iguais a $a = 5,04 \text{ \AA}$, $b = 5,04 \text{ \AA}$ e $c = 13,76 \text{ \AA}$ (Figura 27) [82,84]. Ela pode estar associada à limonita ou magnetita e pode ser encontrada em rochas como granito e sienito, traquitos, originárias da cristalização magmática.

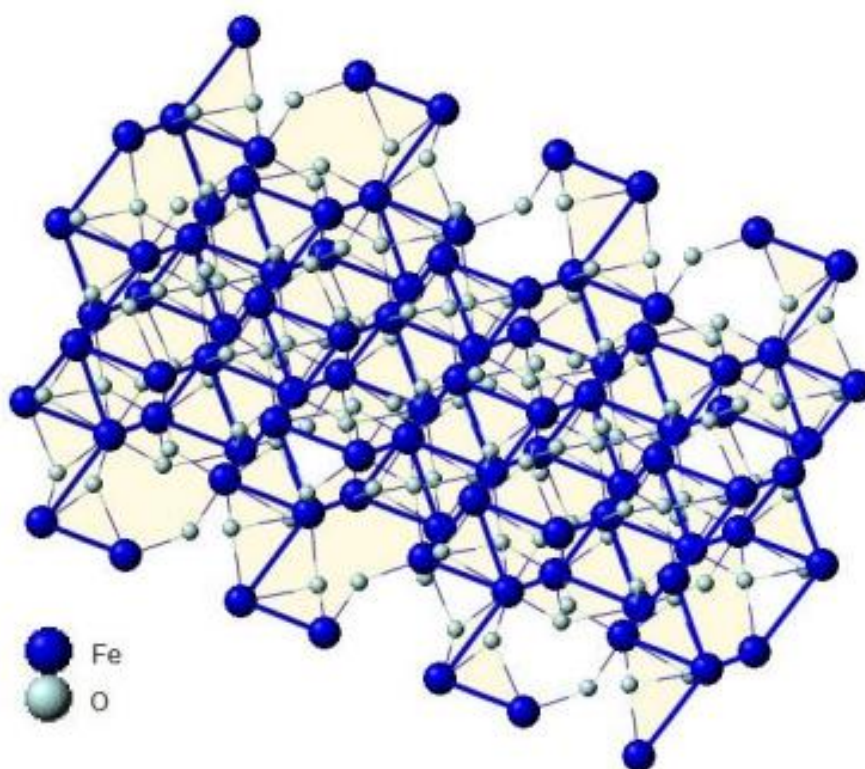


Figura 27: Estrutura cristalina da hematita [82].

4.4.3. Goethita

A goethita é o hidróxido de ferro mais comum e pode ser encontrada com variação de tons, desde marrom amarelado até marrom escuro, com brilho

adamantino submetálico. Sua fórmula química ($FeO(OH)$), e sua composição inclui cerca de 90% de Fe_2O_3 e 10% de H_2O . Considerado um óxido hidratado, mas quando aquecido a temperaturas superiores a 200 °C, pode ser transformado em hematita [82,84]. A goethita apresenta dureza entre 5,0-5,5, traço marrom amarelado ou escuro, densidade de 4,27 g/cm³ e susceptibilidade magnética de (1,28 – 1,7). Sua estrutura cristalográfica ortorrômbica com parâmetros de rede iguais a $a = 4,65 \text{ \AA}$, $b = 10,02 \text{ \AA}$ e $c = 3,04 \text{ \AA}$ (Figura 28) [82-84]. Ela pode ocorrer relacionada à limonita, hematita, pirita, gibbsita e caulinita e também pode estar ligada ao quartzo.

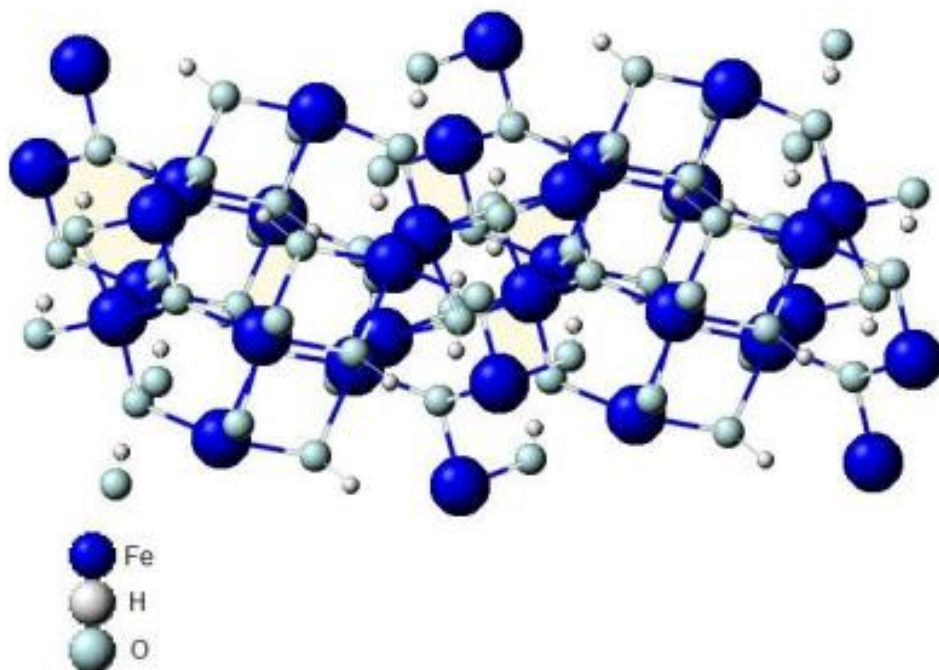


Figura 28: Estrutura cristalina da goethita [82].

Capítulo 5

Resultados e discussões

5.1. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.2. CANINDÉ DE SÃO FRANCISCO - REGIÃO CONTROLE

As informações utilizadas foram as de dois satélites, o Landsat-8 e o Sentinel-2, e como mencionado nas seções anteriores, suas características sensoriais são semelhantes, os dados são complementares. Depois de obter as imagens, foi realizado o tratamento adequado e o recorte da região de controle (Figura 29). Para permitir a melhor visualização de cores, foram utilizadas as bandas do vermelho (banda 4), verde (banda 3) e azul (banda 2) nos canais RGB para ambos os satélites [1,69,73].

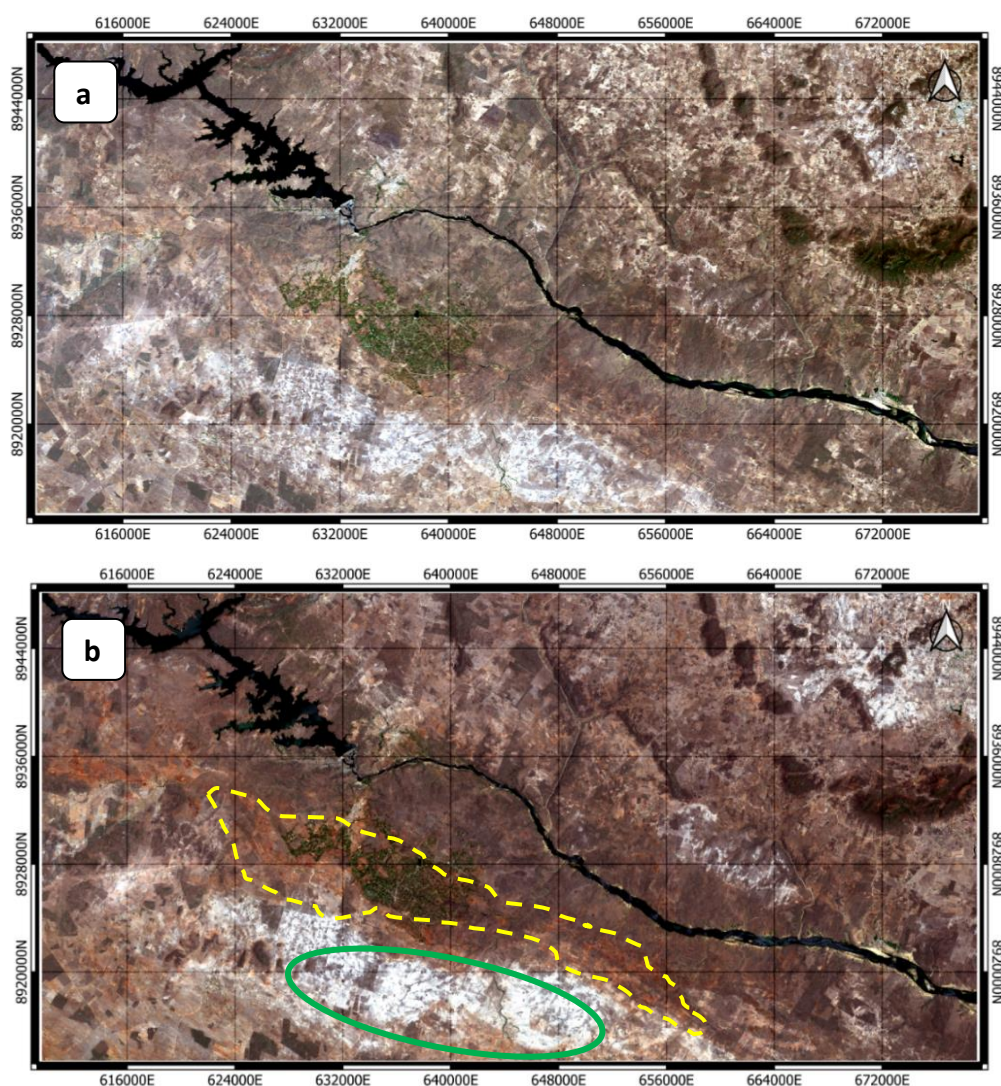


Figura 29: Região de Canindé feita com as bandas do RGB para o Landsat-8 (a) e o Sentinel-2(b). A região destacada em verde e amarelo indicam, respectivamente, solos com alta reflectância e solo com tons mais avermelhados. Em preto é possível ver o Rio São Francisco.

Essas novas imagens RGB permitem uma análise mais detalhada em relação à vegetação, rios e reservatórios, e pequenas diferenças no terreno, pois o olho humano não consegue distinguir leves alterações entre tons de cinza [1]. Por isso foi aplicado as razões de bandas da escala *Spectral* do QGIS [75]. Para facilitar a compreensão e visualização das regiões com possíveis alvos aflorantes, ela realça em vermelho regiões com alto valores, e para regiões com baixo valor a cor azul.

A Figura 29a foi obtida por meio do satélite Landsat-8 e apresenta um solo mais esbranquiçado com níveis altos de reflectância. Há bom detalhamento do Rio São Francisco e detalhamento significativo entre vegetação e solo. A Figura 29b, obtida pelo Sentinel-2, também apresenta bom detalhamento do rio e um solo com níveis de reflectância mais balanceados. Pequenas regiões, destacada em verde na Figura 29b, exibem altos níveis de reflectância, o que impede a visualização mais detalhada da superfície em comparação com a obtida pelo Landsat-8. A imagem também permite visualizar de regiões com solos mais avermelhados, destacada pelas linhas pontilhadas (em amarelo), que se estendem de forma paralela ao Rio São Francisco, passando pela área com maior quantidade de vegetação aparente.

As diferenças observadas nas imagens podem estar relacionadas diretamente com a resolução dos satélites, níveis de reflectâncias captados pelo sensor no momento da captura e alterações temporais no terreno, ao longo de 2 anos entre as imagens. Para obter maiores informações sobre a cobertura de vegetação aparente, foi feito o cálculo de NDVI e aplicada a escala de cores *Spectral*. Para as imagens da região de controle (Figuras 30a e b), foi utilizada a equação 6, e as bandas 5 (NIR) e 4 (RED) do Landsat-8 e as bandas 8 (NIR) e 4 (RED) do Sentinel-2. O objetivo deste método foi observar os locais onde as informações estariam sendo ocultadas pela vegetação. Como o sensoriamento remoto trabalha com a energia refletida pela superfície, se houver camadas de vegetação, as informações podem ser ocultadas [69,73]. Essa barreira pode ser contornada, com a utilização de imagens em datas diferentes.

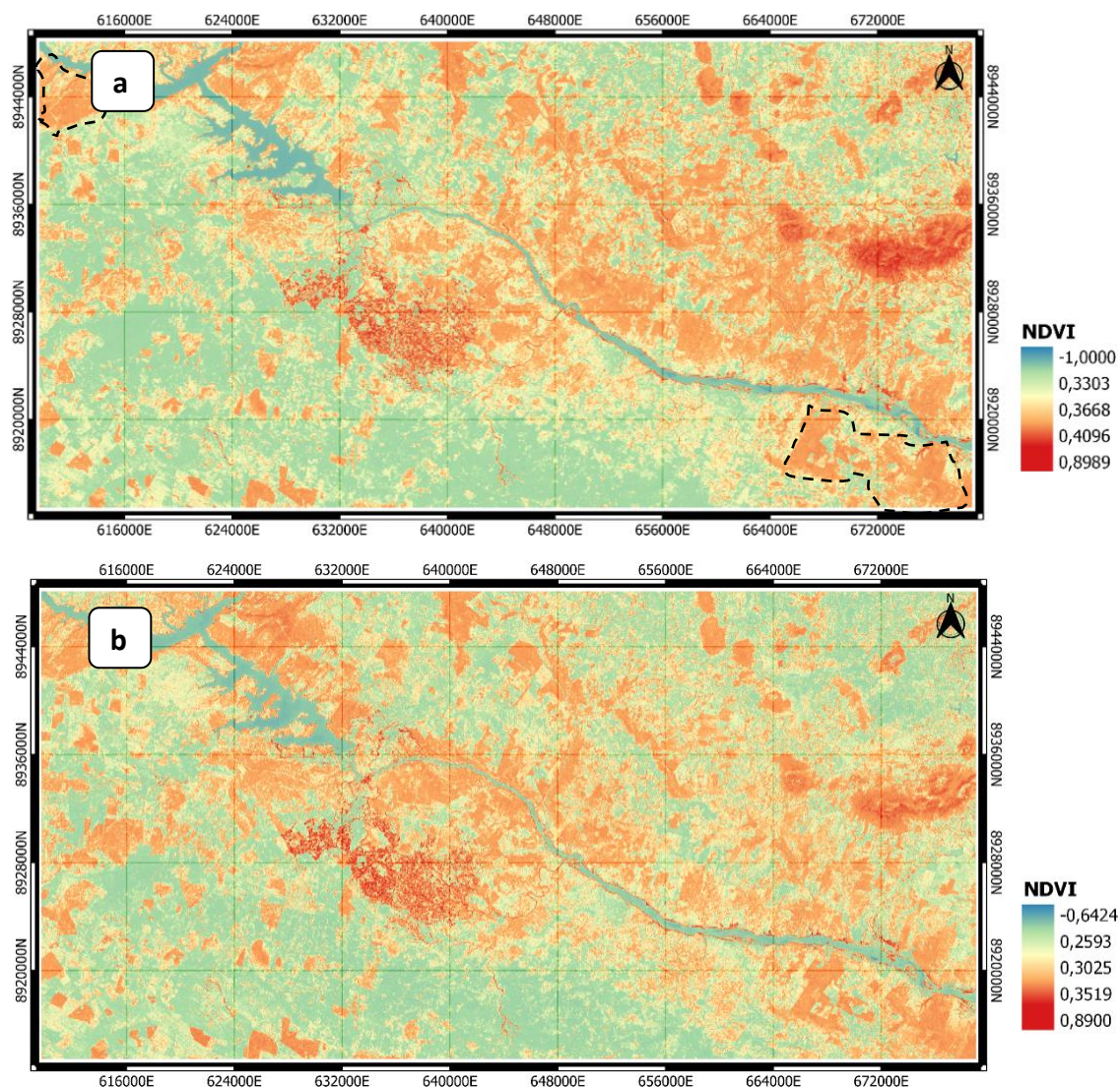


Figura 30: NDVI para Canindé com bandas do Landsat-8 (a) e Sentinel-2 (b). Em cores avermelhadas estão destacadas as características da vegetação, em cores verdes representam locais sem vegetação.

A Figura 30a exibe uma quantidade significativa de vegetação, destacada nos tons alaranjado e avermelhado para regiões com maior densidade. Também é possível observar solos expostos, com tonalidades mais esverdeadas, enquanto o Rio São Francisco fica com o tom azulado. É possível notar a presença de maior vegetação ao ultrapassar o rio, adentrando o estado de Alagoas (parte superior). Alguns pontos que aparentemente não possuem vegetação na Figura 29a são detectados quando o NDVI é aplicado, como destacados por linhas pontilhadas. Essa cobertura de vegetação pode estar sendo ocultada devido à resolução espacial ser de aproximadamente 30m por pixel, mas é possível detectá-la com o uso do NDVI.

A Figura 30b apresenta uma maior cobertura de vegetação no território sergipano pelos resultados obtidos do NDVI, assim como mostra uma diminuição na densidade da cobertura vegetal em certas regiões, no estado de Alagoas. Essa variação na vegetação pode ser favorável pois a diminuição na densidade pode favorecer a visualização de possíveis corpos de minério no solo [69].

A Figura 31a e b mostra a composição que destaca minerais de hidroxila como citado no tópico 3.9. Um ponto negativo nessa razão, é que além de destacar alvos de hidroxilas, ele acaba destacando juntamente a vegetação. Fato esse que ocorre porque ambos apresentarem características espectrais de difícil separação com sensores multiespectrais [69,73].

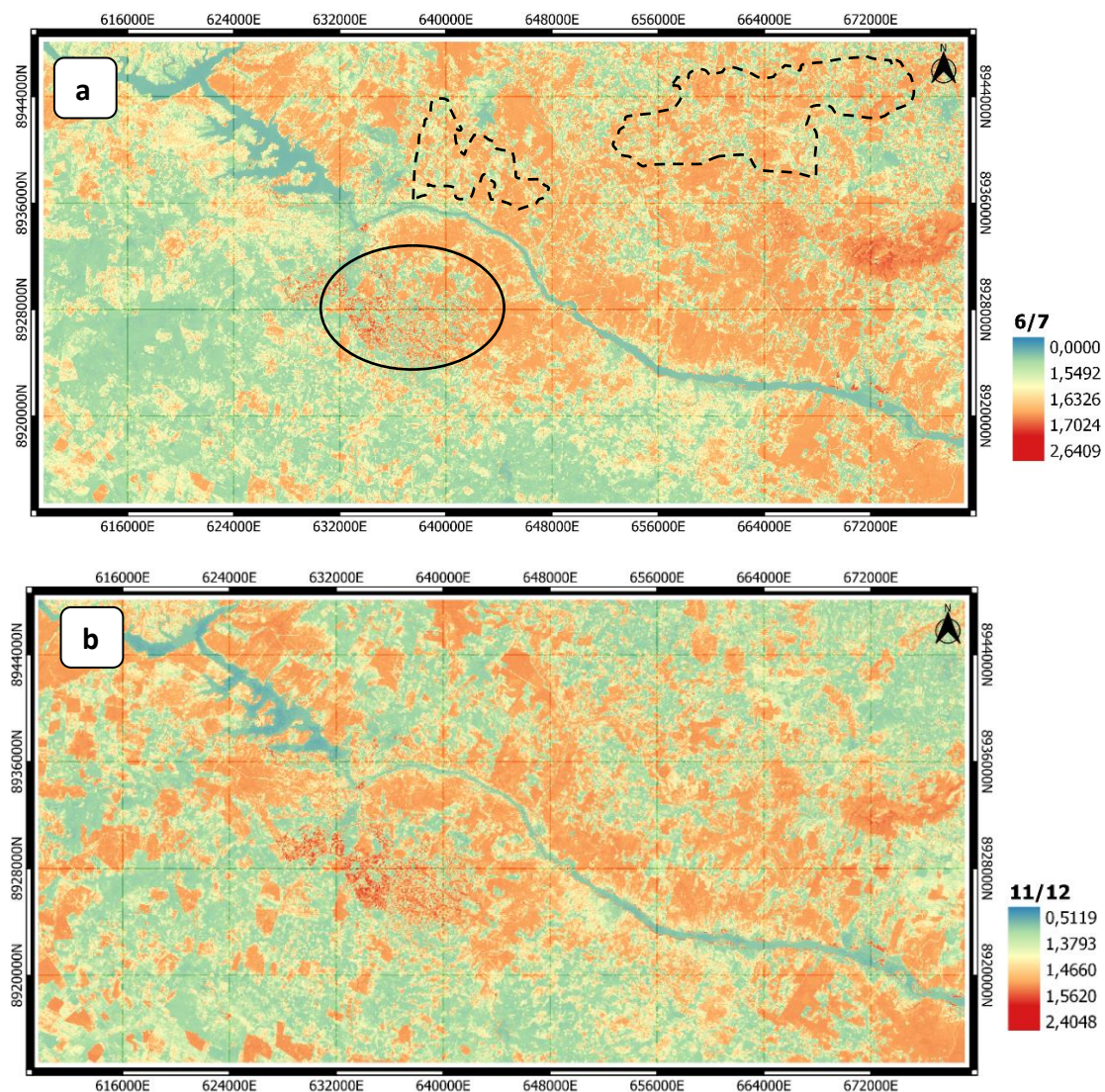


Figura 31: Minerais de hidroxila com as bandas do Landsat-8 (a) e Sentinel-2 (b). Em cores avermelhadas estão destacadas as regiões que apresentam características de hidroxila.

Na Figura 31a, os alvos que são destacados no NDVI continuam realçados. Os corpos que apresentaram indicadores entre 0,3303 e 0,3668 no NDVI, mantiveram essas mesmas características. Alguns pontos passaram a apresentar realce para as hidroxilas, destacadas por traços pontilhados. Enquanto os corpos com indicadores de intensidade iguais a 0,4096 e superiores demonstram uma leve diminuição na intensidade, como apresentada na região circulada.

Para o Sentinel-2 foram utilizadas as bandas 11 e 12 [66], que estão dentro do limite exibido pelas bandas espectrais do Landsat-8. Como os dados adquiridos do Sentinel-2 demonstraram uma maior quantidade de vegetação após o NDVI, era esperado uma maior detecção de hidroxilas pela dificuldade de às distinguir vegetação [69,73]. Os locais que indicaram alta densidade vegetal apresentaram uma leve diminuição, mas continuaram com intensidades relativamente altas (Figura 31b). Seguindo os processos para composição de Chica-Olma, foi reproduzida a composição que utiliza a banda 6, que pôde auxiliar na diferenciação de solos e rochas. Ela apresenta sensibilidade à vegetação, rochas hematíticas e minerais ferrosos, com forte reflectância entre $1,56-1,66\mu m$. Juntamente com a banda 5, que apresenta forte absorção entre $0,845-0,885\mu m$, formando a razão de bandas 6/5 para o Landsat-8 (Figura 32a) [69,73].

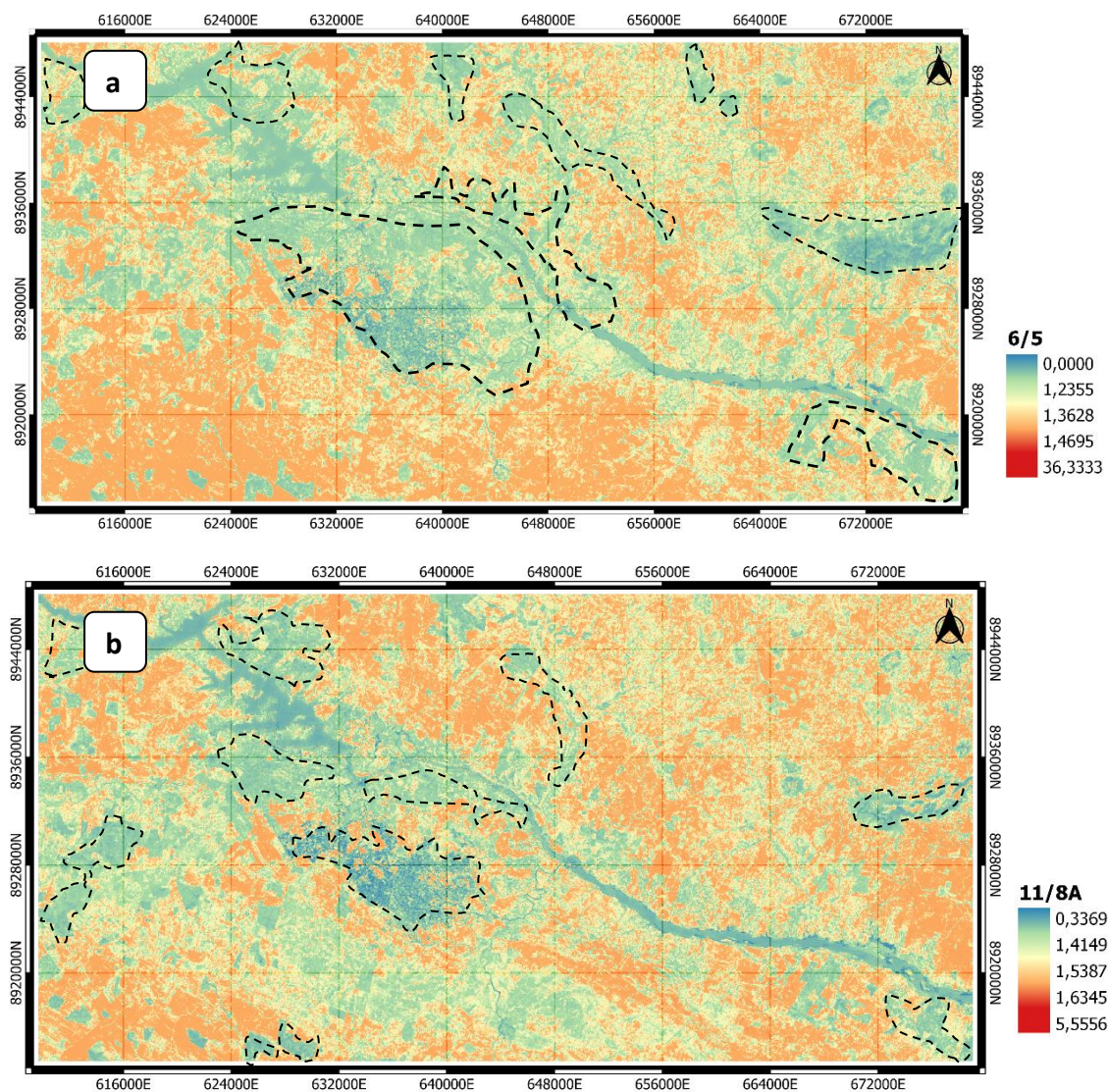


Figura 32: As regiões destacadas indicam predominância de minerais ferrosos para: (a) Landsat-8 utilizando a razão das bandas 6/5; e (b) Sentinel-2 utilizando as bandas 11/8A.

Em ambas as imagens (Figura 32a e b) foi destacada a presença de minerais ferrosos distribuídos em uma ampla área da região de controle. No entanto, é importante destacar que os locais que não apresentam sinais de minerais ferrosos combinam-se perfeitamente com os pontos onde há presença de vegetação, destacados por linhas tracejadas. Também é possível ver (Figura 32b) regiões que não foram realçadas para presença de minerais ferrosos, nem vegetação, quando comparadas com os resultados do NDVI. Isso pode estar relacionado à faixa espectral da banda 11, pois ela possui um comprimento de onda um pouco maior em relação a banda 6 do Landsat-8, e uma melhor resolução espacial.

Seguindo como base a composição de Chica-Olma, a próxima composição a ser feita foi a que destaca óxidos de ferro, utilizando as bandas 4 e 2 [66,69]. O óxido de ferro apresenta características de absorção entre $0,4 - 1,1 \mu m$, dessa forma, as variações mais significativas entre a reflectância e absorção estão entre as faixas de $0,63 - 0,69 \mu m$ (Banda 4) e $0,4 - 1,1 \mu m$ (Banda 2) para ambos os satélites. Assim a razão 4/2 serve para realçar os óxidos de ferro como hematita e goethita [66,73,71]. Por meio dessa composição foram geradas as imagens da Figura 33, destacando regiões com possível presença de óxido de ferro.

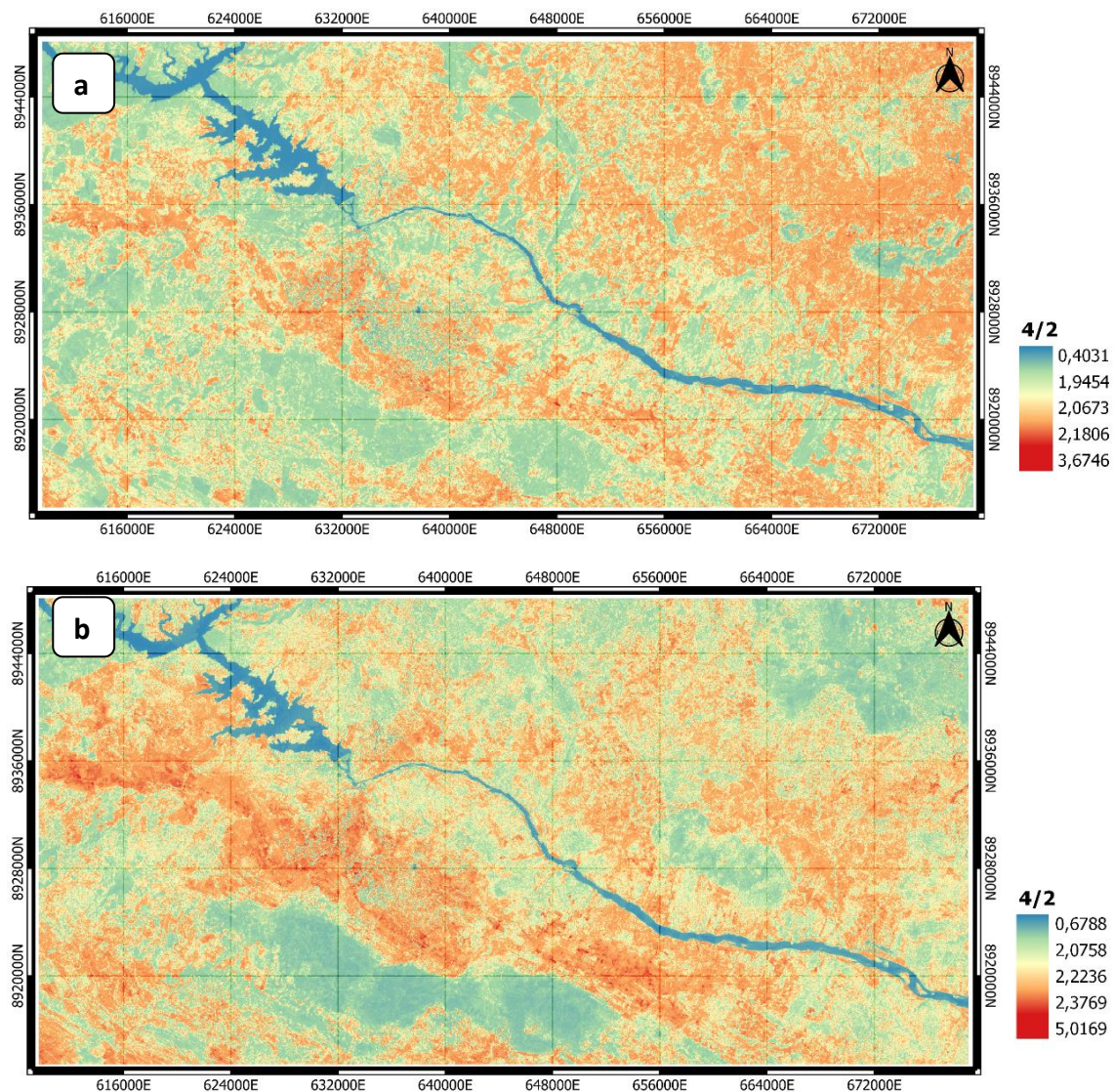


Figura 33: Composição para óxidos de ferro para o Landsat-8 (a) e Sentinel-2 (b). Em cores avermelhadas é indicado características da presença de óxidos de ferro.

Tendo todas as razões de bandas utilizadas por Chica-Olma e Sabin (Figuras 31 a 33), é possível utilizá-las para criar uma composição colorida. Cada razão feita é direcionada para um canal colorido específico, ganhando uma coloração específica para cada minério. As razões foram posicionadas seguindo a distribuição de Chica-Olma já citada anteriormente, para o Landsat-8 e Sentinel-2 foram geradas as Figuras 34a e 34b, respectivamente. Com essa distribuição, os minérios, a vegetação e a água ganham uma coloração específica, permitindo a identificação e distinção com maior facilidade dos alvos expostos, e permitindo que possíveis pontos de visita a campo sejam selecionados.

Na imagem obtida com o Landsat-8 (Figura 34a), os minerais argilosos têm tonalidade lilás enquanto que a vegetação apresenta tons rosados escuros, dificultando assim a distinção entre eles. Já a água fica na cor preta, os ferro/minerais ferrosos ficam na cor verde claro e os óxidos de ferro na cor azul claro [66]. Na imagem obtida a partir do Sentinel-2 (Figura 34b), é possível observar algumas diferenças nas intensidades das cores relacionadas aos minerais ferrosos, óxidos de ferro e minerais de argila. Os minerais e óxidos de ferro, apresentam cores mais intensas, enquanto os minerais de argila diminuem a intensidade.

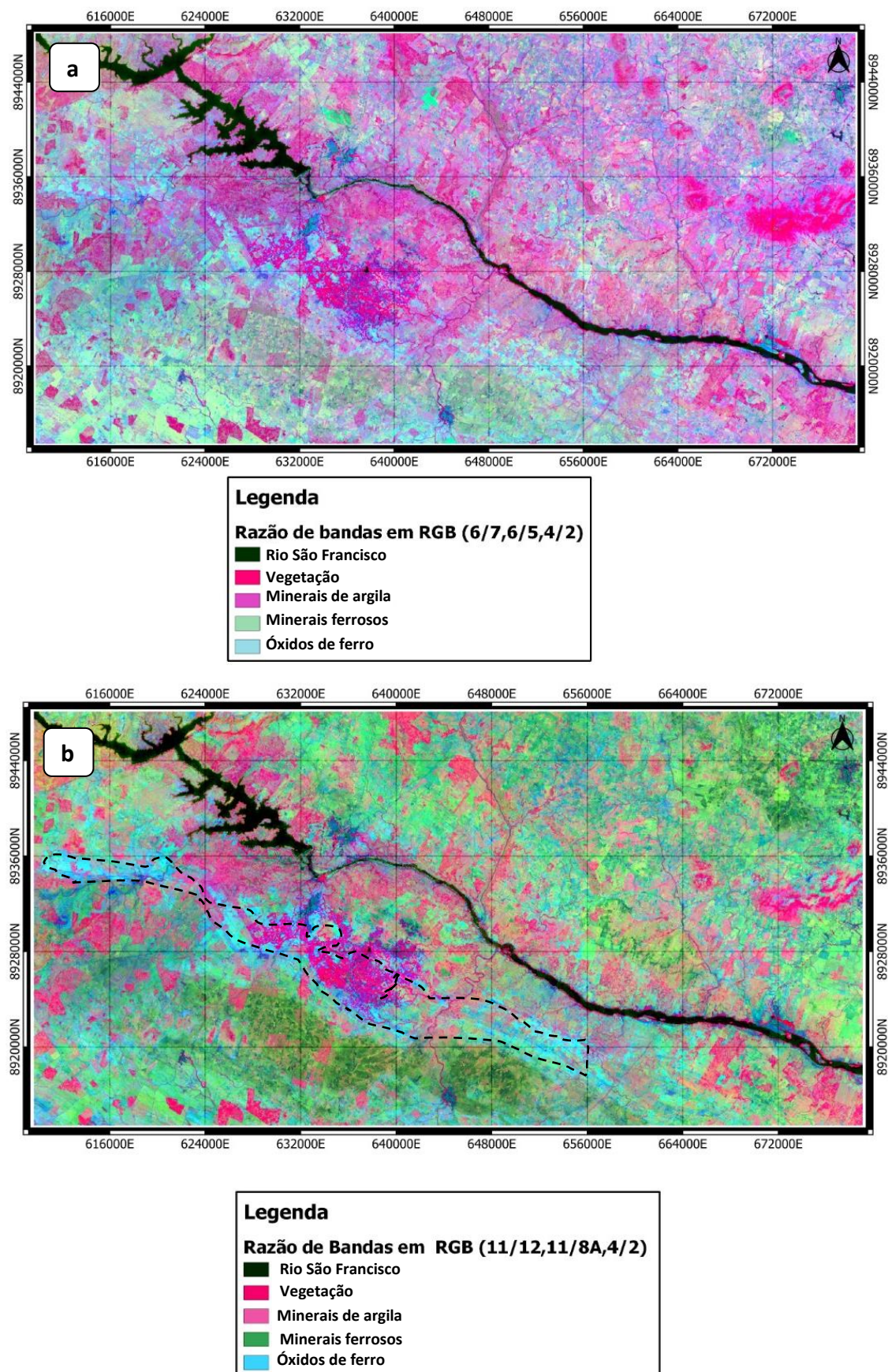


Figura 34: Composição colorida para região de controle, a qual utilizou a distribuição de Chica Olma (6/7, 6/5, 4/2) para o landsat-8 (a) e (11/12, 11/8A, 4/2) para o Sentinel-2 (b).

A Figura 34a apresenta cores com tons muito próximos para a vegetação e para os minerais de hidroxila. Estas cores, por serem muito semelhantes, incapacitam a distinção entre a vegetação e o solo argiloso. Para o restante da região, é possível visualizar tons azulados, indicando a presença de óxidos de ferro, assim como tons esverdeados indicando minerais ferrosos. Como a intensidade entre os tons do azul e do verde não apresentam muita variação, a separação deles acaba sendo bastante complicado.

Na Figura 34b é possível perceber a clara separação entre as cores dos minerais ferrosos em verde e dos óxidos de ferro em azul, possibilitando uma melhor definição. Comparando este resultado com a Figura 29b, que possui cores naturais, é visível que a região indicada como possuir óxidos de ferro, é a mesma que teve uma tonalidade avermelhada, destacada por linhas amarelas. Em relação à vegetação e aos minerais de argila, a pouca diferença de tonalidade torna difícil uma análise mais aprofundada, além de acobertarem possíveis corpos de minério aflorantes. Para obter uma visualização dos resultados em três dimensões, foi feito uma sobreposição das imagens coloridas (Figura 35) com o MDE por meio do software QGIS.

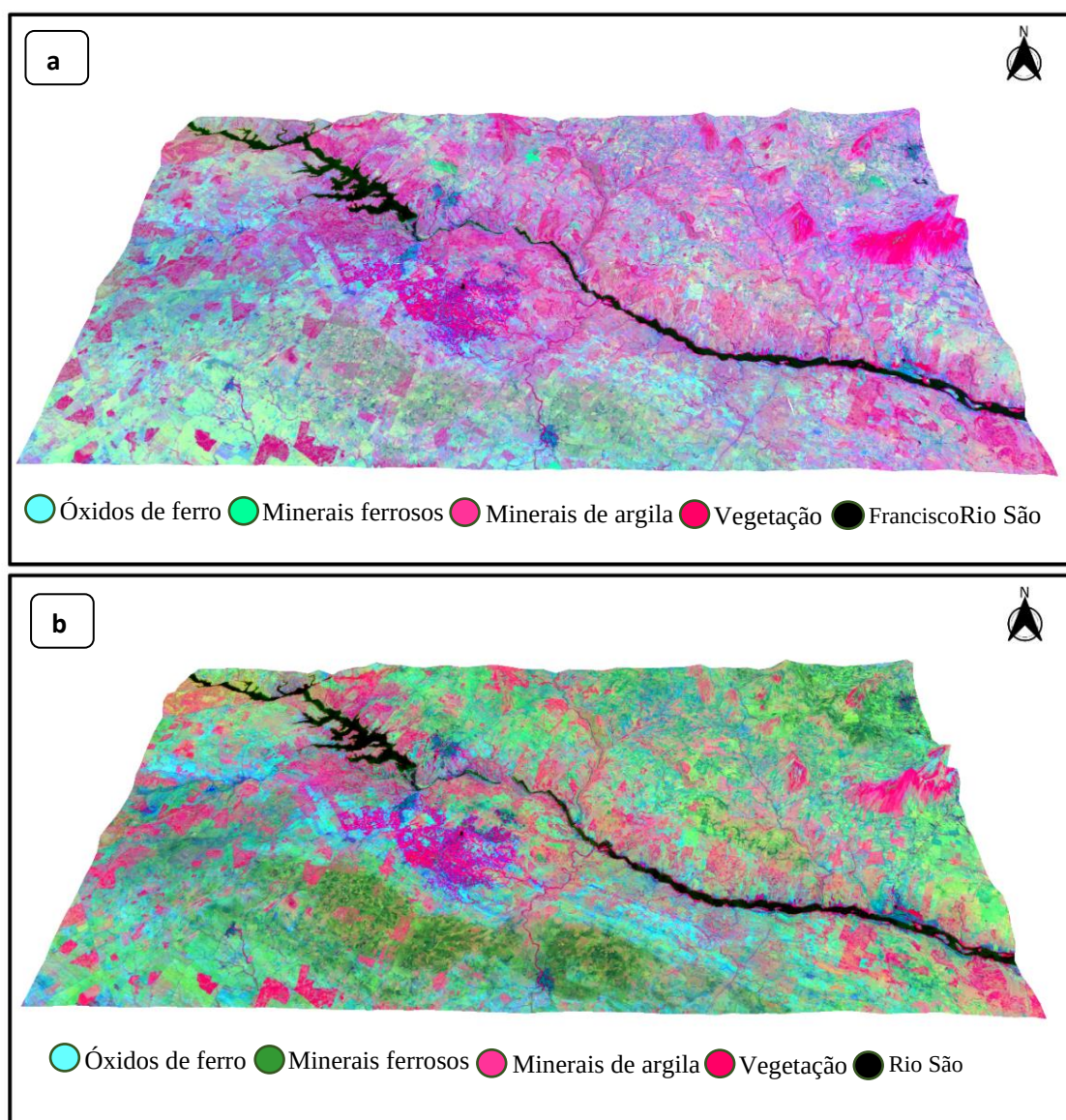


Figura 35: Composição Chica-Olma sobreposta no MDE para o Landsat-8 (a) e Sentinel-2 (b).

As informações obtidas no presente trabalho foram comparadas com os dados do Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado de Sergipe de 2014 [85]. O mapa apresenta as características dos jazimentos minerais presentes em cada região, e a partir dele foi extraída a região de estudo (Figura 36). Note, é indicado a presença de metais ferrosos e não ferrosos, como por exemplo Ferro (Fe), Manganês (Mn), Titânio (Ti), Cobre (Cu), Chumbo (Pb) entre outros.

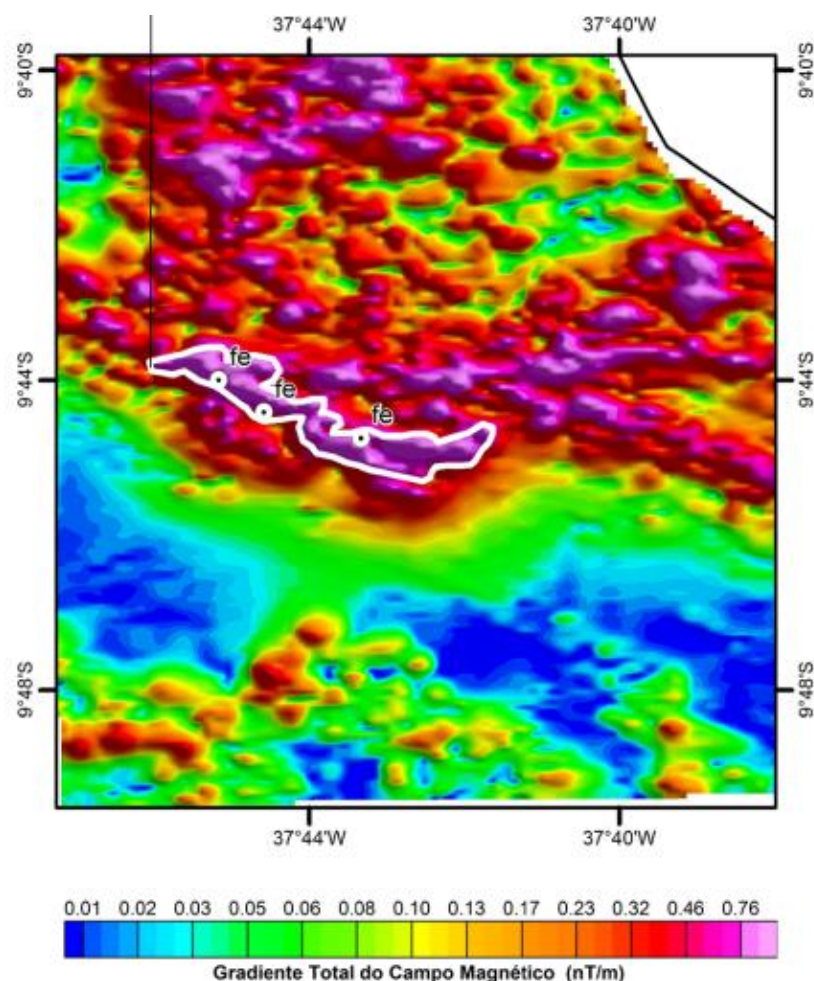


Figura 37: Gradiente total do campo magnético anômalo para região de controle [74].

5.3. REGIÃO DE GARARU/SE

A análise da região de Gararu/SE foi feita de forma semelhante à da seção anterior, região de controle. A imagem RGB obtida pelo Landsat-8 (Figura 38a) apresenta diferentes tonalidades de cores e bom detalhamento entre os tipos de solo, mostrando tonalidades mais escuras e quantidade significativa de áreas de vegetação. Enquanto para o Sentinel-2, uma significativa área de vegetação também foi observada, assim como foram observados tons mais claros para os solos (Figura 38b), o que favorece uma análise mais completa da superfície.

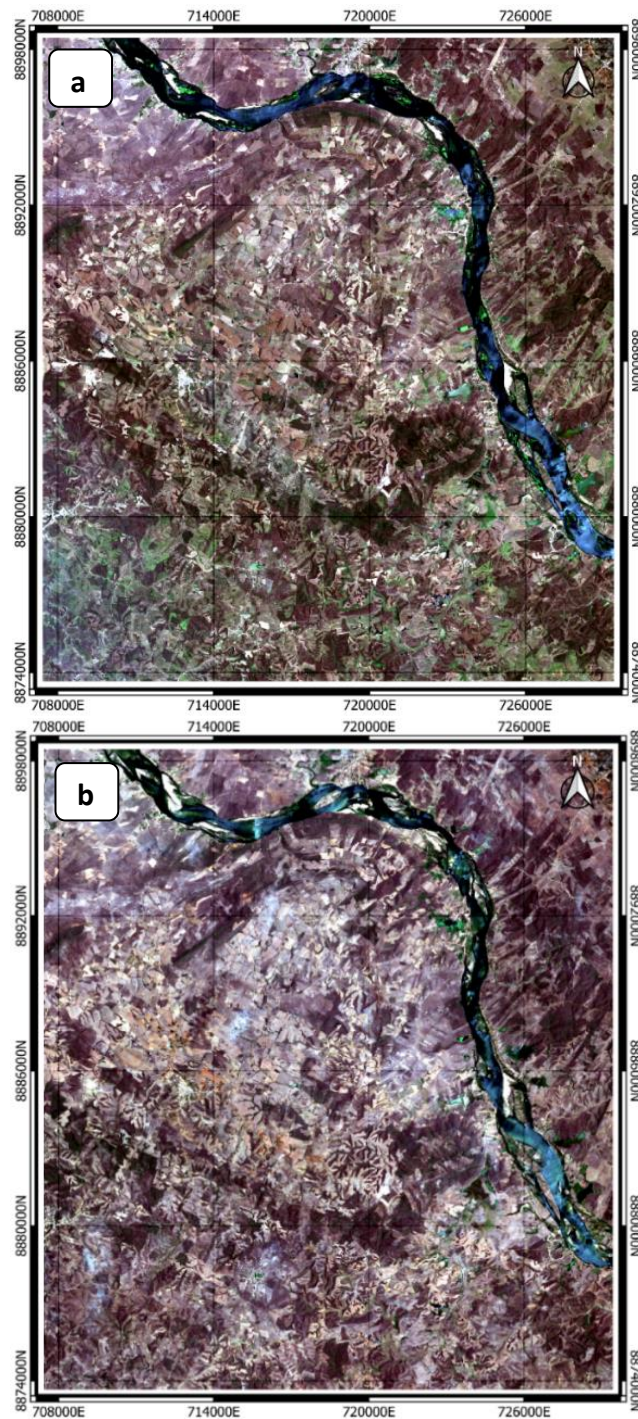


Figura 38: Região de Gararu feita com as bandas do RGB para o Landsat-8 (a) e Sentinel-2(b).

As diferentes tonalidades podem estar relacionadas a características como solos áridos, solos com maior ou menor umidade, solos preparados para o plantio, entre outras [86,87]. É possível encontrar água com diferentes tons, indicando que a água contém sedimentos em suspensão, ou pode ser pela presença de vegetação na superfície, bem como na região costeira do Rio São

Francisco [88,89]. Para identificar regiões com cobertura densa de vegetação, foi usado o NDVI usando a equação 6. Os resultados estão apresentados na Figura 39.

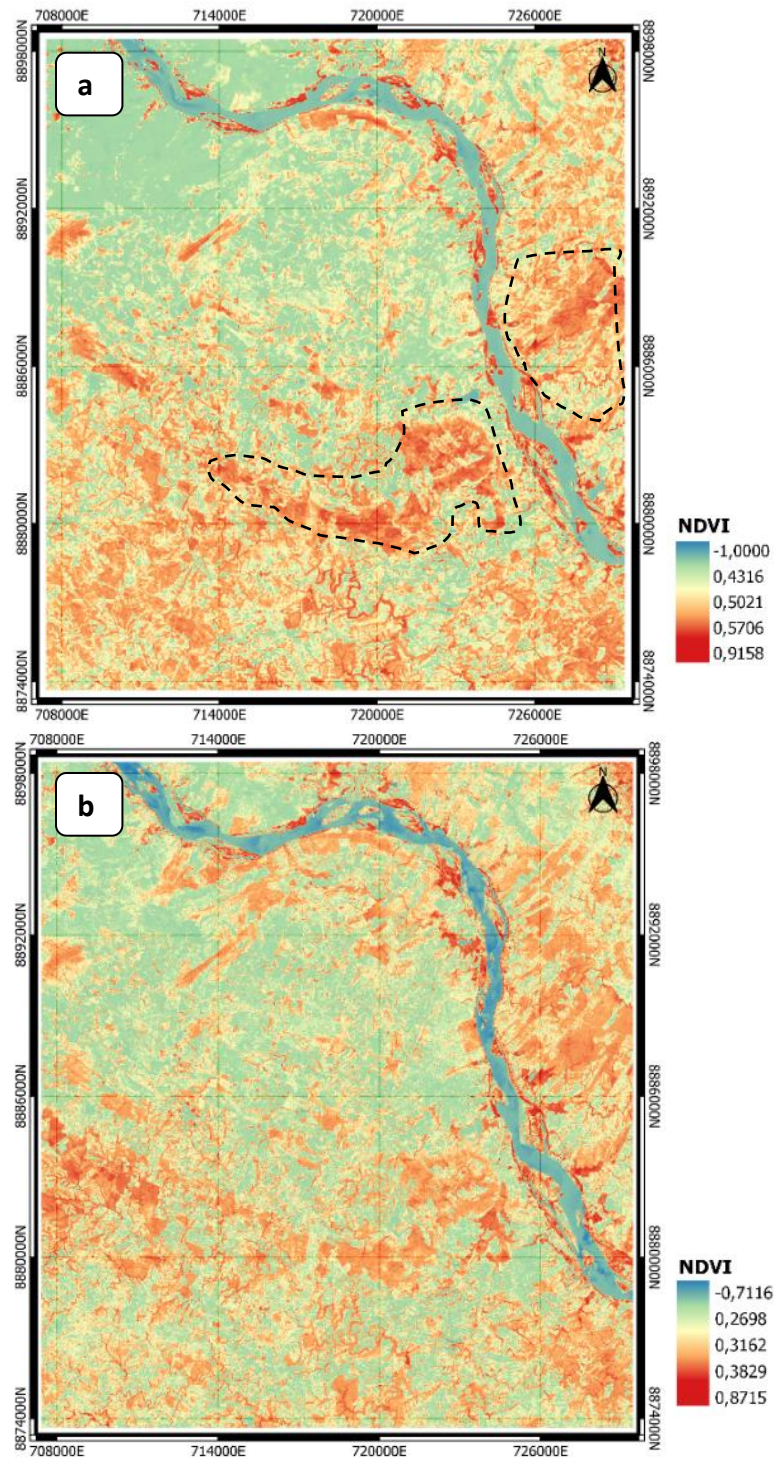
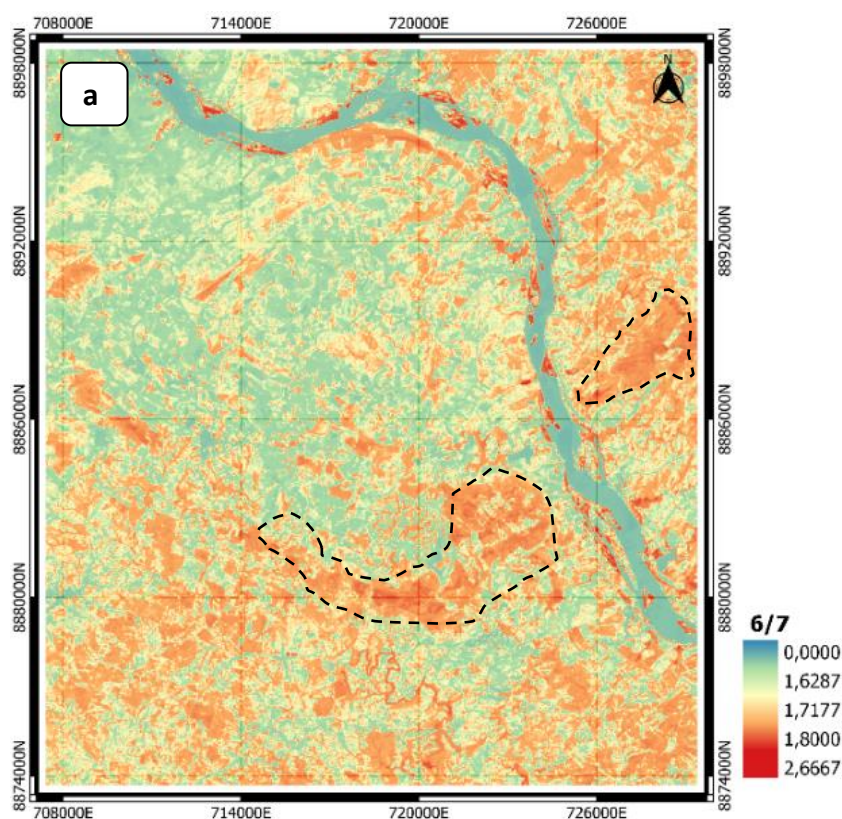


Figura 39: NDVI para região de Gararu/SE para os satélites Landsat-8 (a) e Sentinel-2 (b). Em cores avermelhadas são destacadas características da presença de vegetação.

É possível observar que a imagem obtida pelo Landsat-8 (Figura 39a) apresenta uma densidade maior de vegetação (região destacada) que a obtida pelo Sentinel-2 (Figura 40b). É notável que os valores de intensidade da vegetação apresentados nas imagens do Landsat-8 são relativamente maiores que nas imagens do Sentinel-2 para as regiões de Canindé do São Francisco e Gararu. Sugerindo que o sensor OLI apresenta maior sensibilidade a detecção de vegetação.

Para aplicar a composição Chica-Olma na região de Gararu/SE, foram usadas as mesmas razões de bandas que para região de Canindé de São Francisco. A primeira razão feita visou detectar hidroxilas, portanto, as razões de bandas aplicadas foram as 6/7 para o Landsat-8 (Figura 40a) e 11/12 para o Sentinel-2 (Figuras 40b).



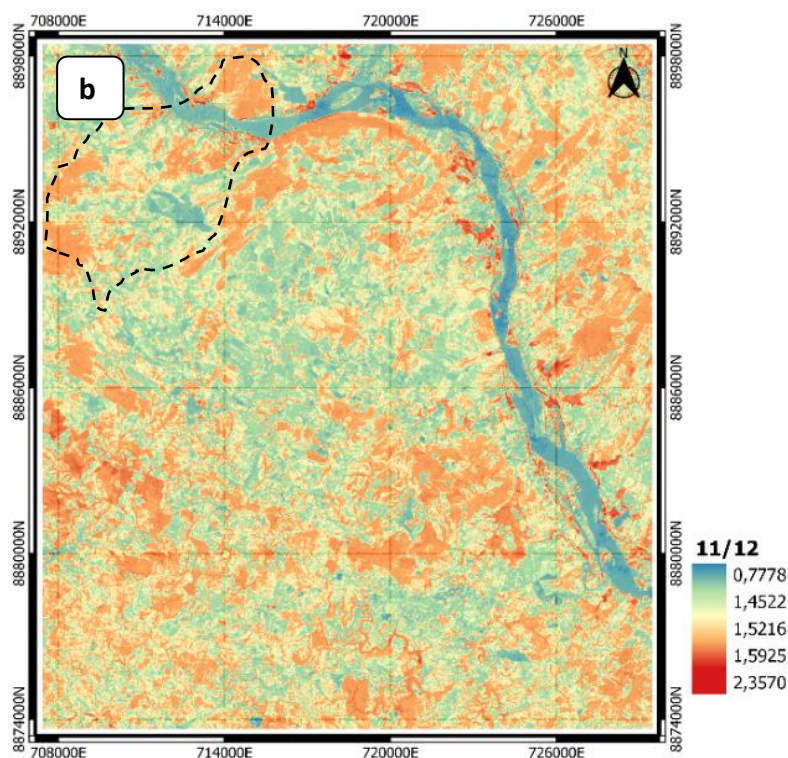


Figura 40: Razão de bandas para minerais de hidroxila, que utilizam imagens do Landsat-8 (a) e Sentinel-2 (b). Em cores avermelhadas estão destacadas as características de hidroxila.

A Figura 40a apresenta resultados similares aos da Figura 31a (seção anterior), nas quais é possível ver afloramentos de minério de intensidades fraca, com tons amarelados. Há também uma redução da intensidade dos corpos classificados como vegetações densas pelo NDVI, indicados por linhas tracejadas. Essas semelhanças nas composições podem estar ligadas à utilização de bandas com características similares tanto para argila quanto para vegetação [73]. Na Figura 40b, a quantidade de áreas que apresentaram valores de intensidade média para hidroxila cresceu em comparação ao NDVI. Isso é perceptível pela maior quantidade e distribuição de regiões avermelhadas, como por exemplo na região destacada por linhas tracejadas, área que não apresenta muitas características no NDVI. Fato semelhante aconteceu quando foi analisada a região de Canidé (Figura 31b, seção anterior), indicando que para identificação de hidroxilas o sensor MSI presente no Sentinel-2 é melhor, mesmo utilizando faixas com comprimentos de onda no mesmo intervalo que o sensor OLI.

Fazendo agora a análise dos minerais ferrosos, uma quantidade grande de minérios foi destacada e pode ser visto na parte superior das Figuras 41a e 41b, sinalizadas por linhas tracejadas.

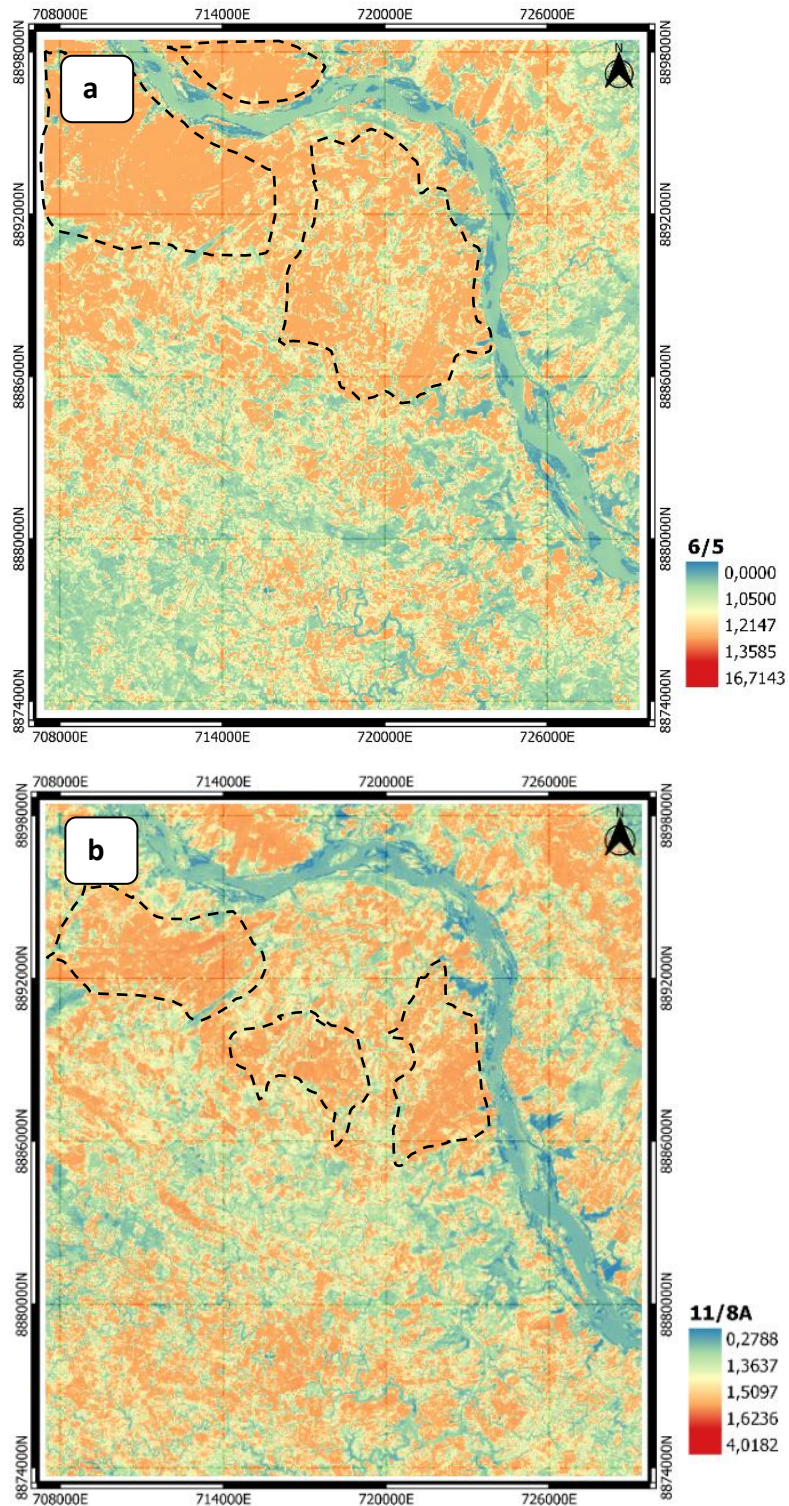
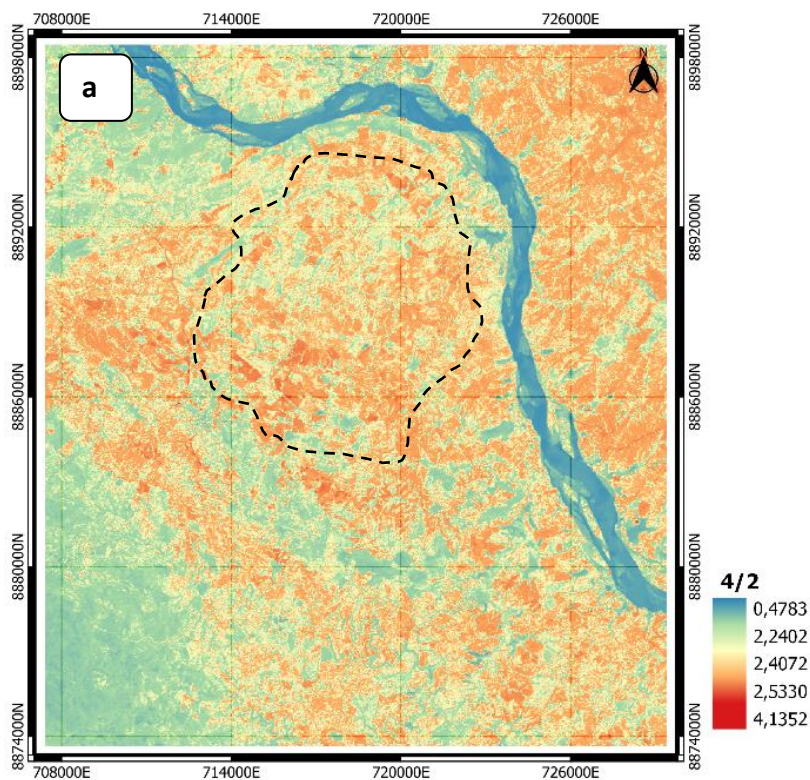


Figura 41: Razão de bandas para detectar minerais ferrosos Landsat-8 (a) e Santinel-2 (b). Em cores avermelhadas estão destacadas as características de minerais ferrosos.

Uma característica notável na Figura 41 entre os sensores é que o OLI, presente no Landsat-8, apresenta maiores intensidades para minerais ferrosos, enquanto o MSI, apresenta regiões mais discretas, e com maior riqueza de detalhes no tamanho e forma dos alvos. Isso é possível devido a utilização da banda espectral 8A, com pixels de 20m, que oferece uma maior resolução espacial.

Na Figura 42 são apresentadas as imagens da razão entre as bandas 4 e 2 tanto para o Landsat-8 (Figura 42a) quanto para o Sentinel-2 (Figura 42b). Pelo Landsat-8 (Figura 42a), as regiões com maior intensidade estão na parte central da figura, indicada por linhas tracejas, assim como a região superior direita da imagem. De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 39-40, estes são locais com baixo índice de vegetação e argila. Em locais com alto índices de vegetação, somente pequenos corpos de minério foram detectados, indicando a possível mistura entre solos ricos em óxidos de ferro e a vegetação. Pelo Sentinel-2 (Figura 42b), é possível ver uma distribuição mais acentuada de óxidos de ferro na região oeste da figura, destaca pela linha tracejada. Esses resultados demonstraram que ambos os satélites apresentam potencial para identificar óxidos de ferro.



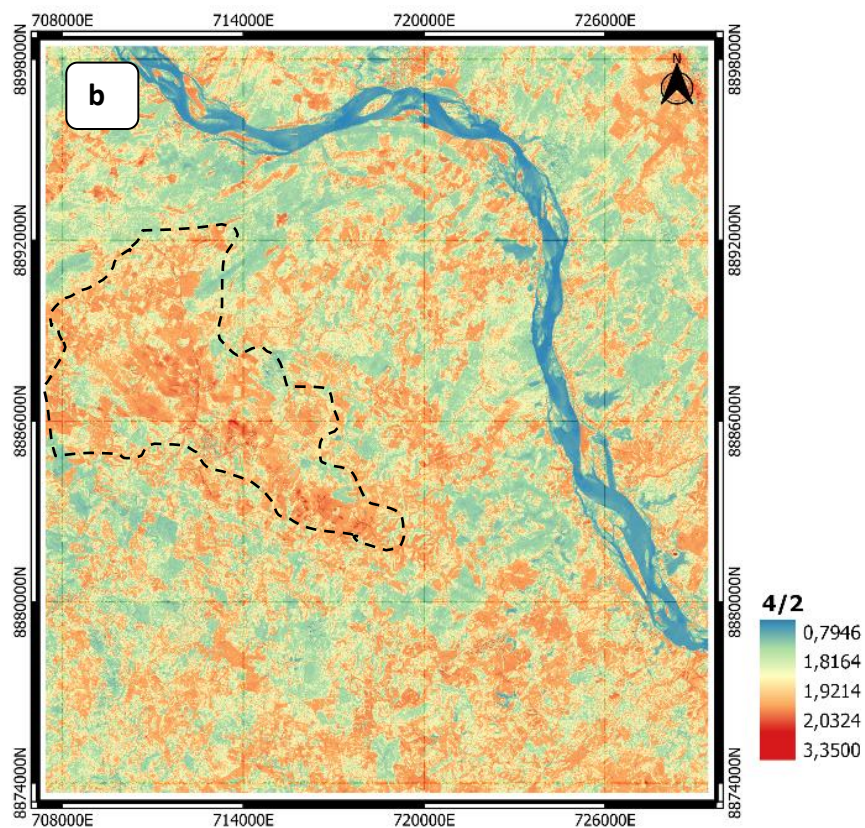


Figura 42: Razão de bandas para óxidos de ferro, utilizando imagens do Landsat-8 (a) e do Sentinel-2 (b). Em cores avermelhadas estão destacadas as características de óxidos de ferro.

Após realização das razões de bandas para os sensores OLI e MSI, Figuras 40 – 42, ocorreu a aplicação delas nos canais RGB, obtendo a composição colorida de Chica-Olma (Figura 43). Cada cor indica um determinado grupo de minérios, da mesma forma como feito para região de Canindé de São Francisco na seção anterior.

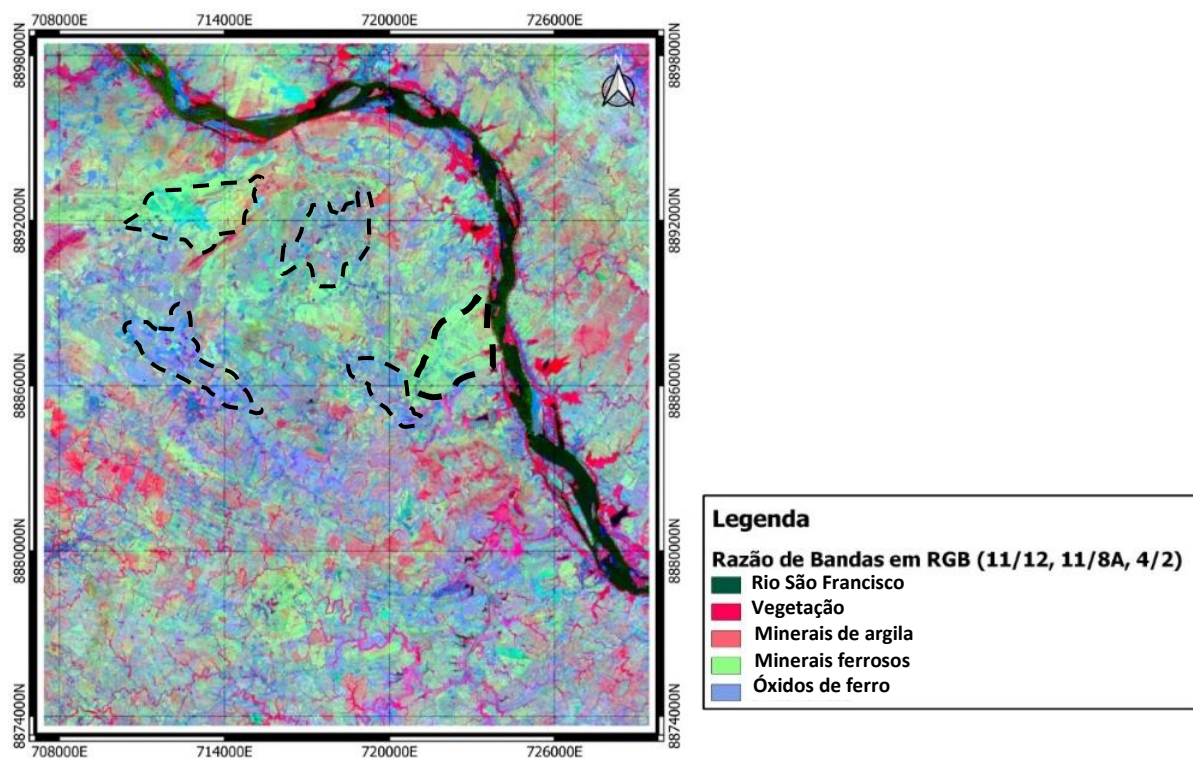
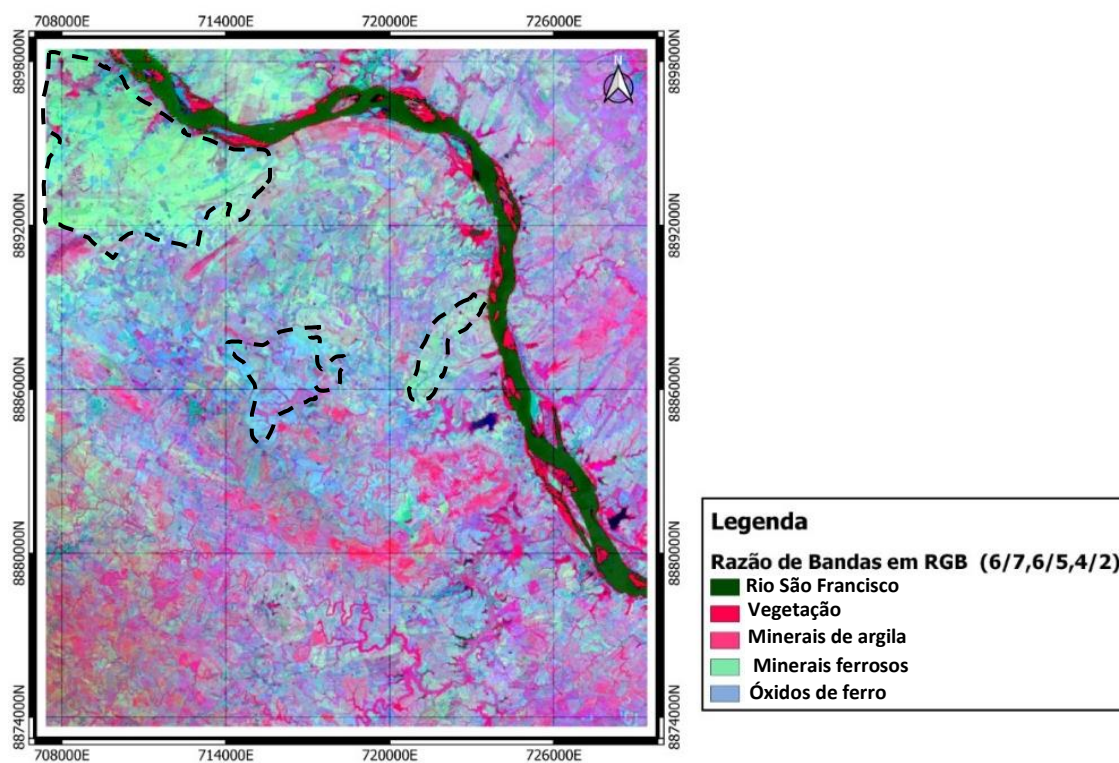


Figura 43: Composição de Chica-Olma para o sensor OLI (a) e MSI (b).

A imagem gerada para região de Gararu/SE utilizando as bandas obtidas a partir do Landsat-8 (Figura 43a) apresentou tonalidades esperadas,

porém com difícil distinção em alguns casos. As cores relacionadas com vegetação e argila são similares uma vez que essas regiões possuem semelhanças espectrais, tornando assim inviável a distinção entre elas. O rio São Francisco está apresentado com a cor verde escuro. Para os minerais e óxidos de ferro, é possível fazer a distinção em algumas regiões de forma mais clara, como demonstrado nas áreas tracejadas. Em outras regiões, a separação entre minerais, óxidos e vegetação é prejudicada, pois são manifestados pequenos corpos, surgindo pixels variados. Sugerindo a mistura entre solos ricos em minérios e em vegetação. A partir do Sentinel 2 (Figura 43b) foi possível obter uma melhor distinção dos alvos distribuídos pela superfície. Estando os minerais ferrosos e óxidos de ferro presentes em regiões de melhor identificação, como as regiões demarcadas por linhas tracejadas.

Assim como para a região de Canindé de São Francisco, os resultados aqui obtidos corroboraram com os jazimentos demarcados na literatura, entregando um maior grau de confiabilidade na técnica adotada. Com esse detalhamento nas informações para Gararu/SE foi possível a seleção de locais para visitas a campo, como será mostrado na próxima seção.

Por meio das Figuras 43a e 43b foi possível construir a visualização em três dimensões, indicando locais mais elevados e a disposição dos alvos destacados. A figura 44 mostra que o ponto mais alto possui uma cobertura espessa de vegetação, assim como a distribuição de óxido de ferro e minerais ferrosos ao seu redor. Esse resultado também é uma ferramenta que permite escolher locais para voos com veículos de baixa altitude, para obtenção de imagens com maior resolução espacial. Possibilitando visualizar a real quantidade de vegetação, exposição de rochas na superfície e pequenos reservatórios, os quais são impossíveis de serem detectados com os sensores estudados.

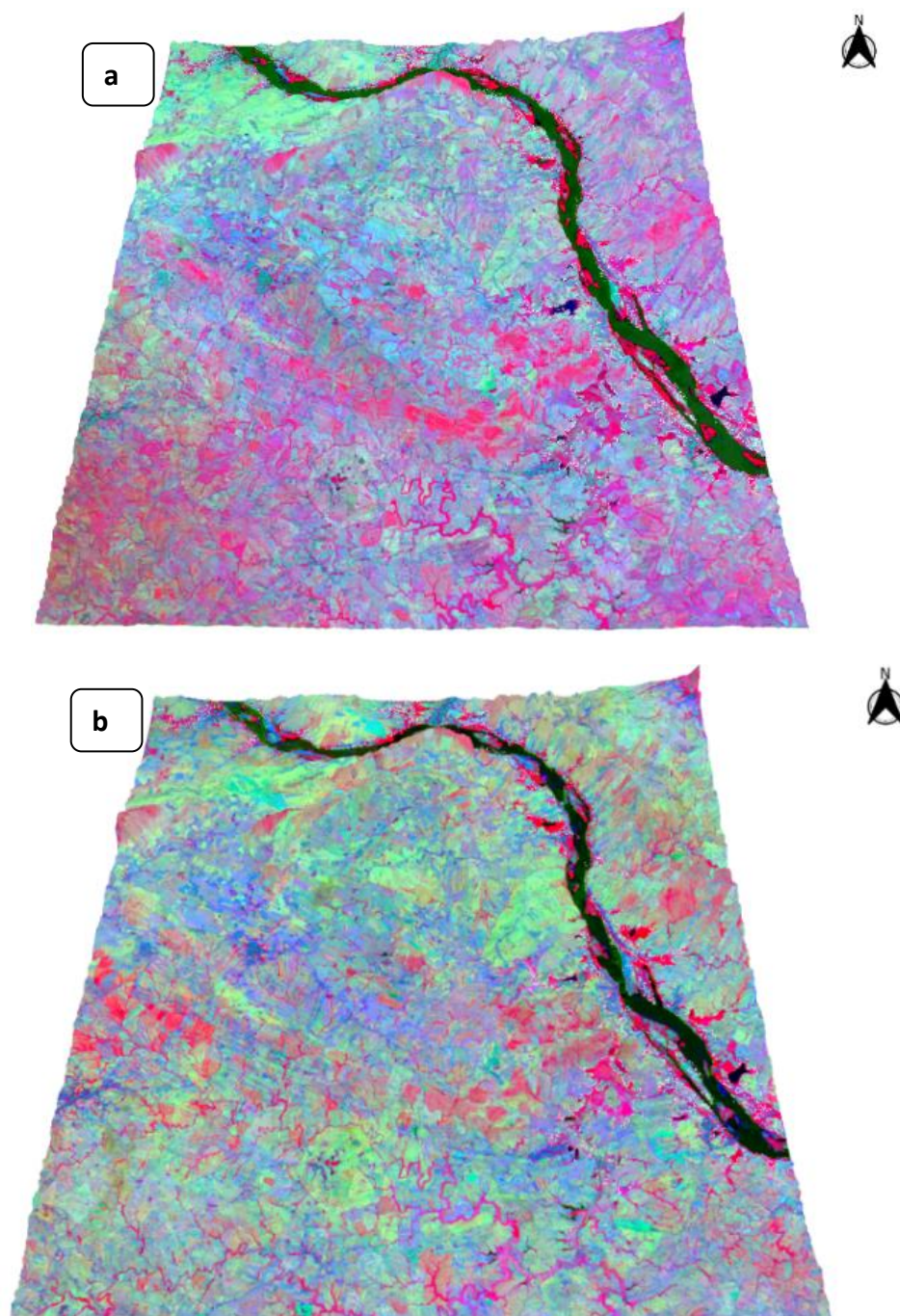


Figura 44: Composição Chica-Olma sobreposta no MDE para o Landsat-8 (a) e Sentinel-2 (b).

No mapa geológico do Estado de Sergipe publicado até 2014 (Figura 45) [85] não havia o indicativo da presença de jazidas de ferro ou minerais metálicos. Logo, são apresentados em vermelho formações que coincide com a formação da suíte intrusiva Gloria-Xingó-2, a qual pode exibir granitos a muscovita ou ser uma região ferrosa a magnesiânica.

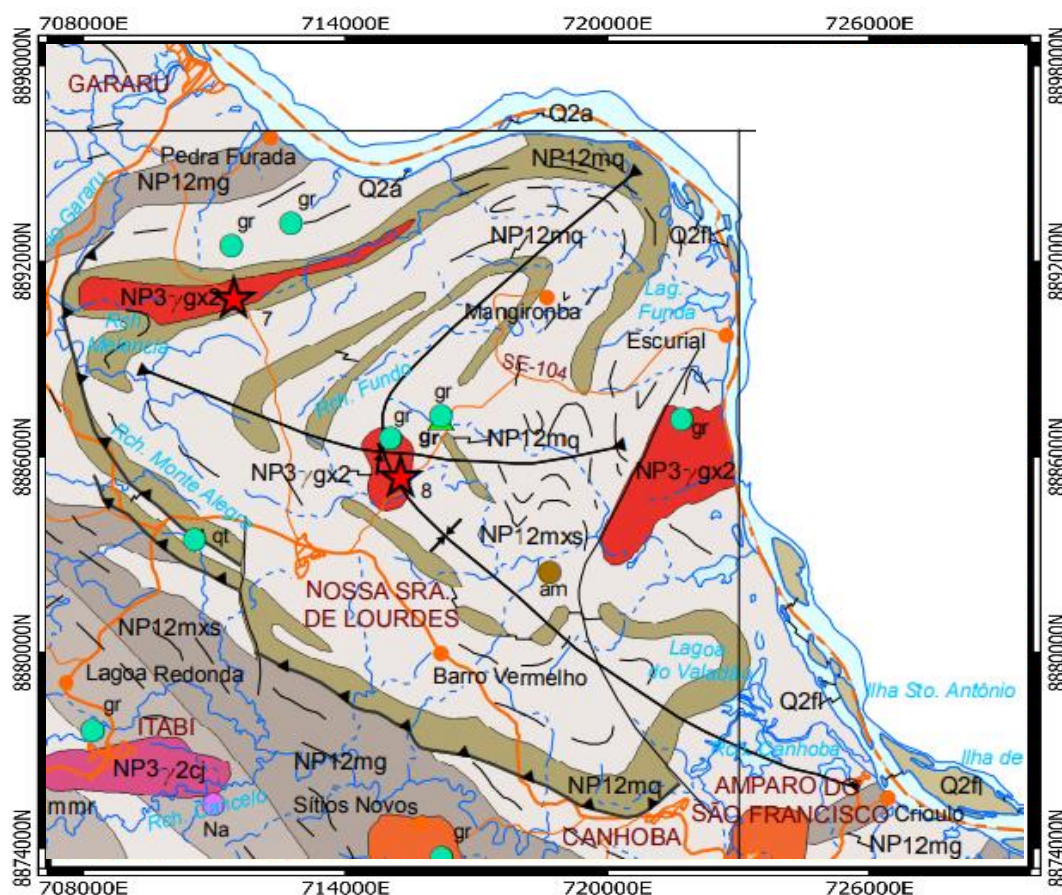


Figura 45: Região de Gararu/SE no mapa geológico do Estado de Sergipe [85].

Adicionalmente, foram adquiridos os dados magnéticos (Figura 46) da região analisada, sendo um total de 4 figuras. Esses dados foram fornecidos pela Inventos, empresa parceira. As figuras foram utilizadas para construção do ortomosaico dos dados magnéticos, que indica a primeira derivada vertical da anomalia magnetométrica, filtrando as fontes mais rasas [74]. Nas regiões mais elevadas (tons rosas) é observado a presença de uma anomalia que se prolonga por uma grande região destacada por linhas tracejadas. Ela passa por áreas que indicam a possibilidade de encontrar alvos como óxido de ferro e minerais ferrosos. Outros pontos anômalos também apresentam correlação com corpos de óxido de ferro. A junção dessas informações, com as adquiridas após as composições já feitas, permitem a correlação para seleção de diversos pontos a serem visitados.

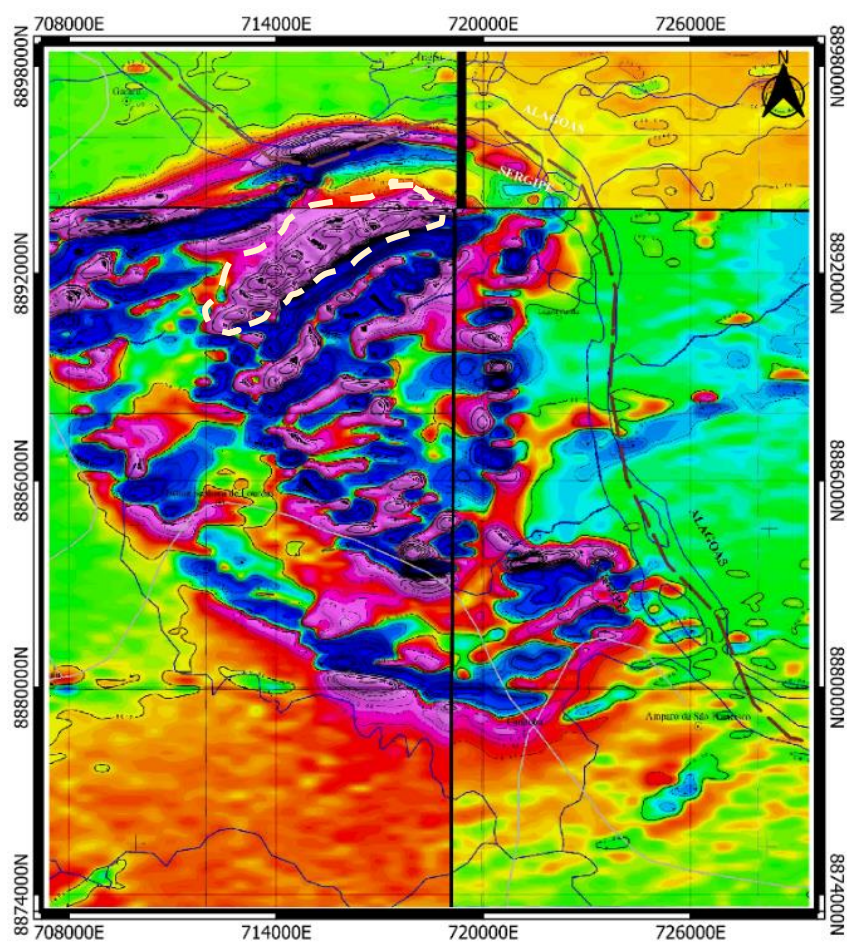


Figura 46: Gradiente total do campo magnético anômalo para região de Gararu/SE.

5.3.1. MISSÃO DE CAMPO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AMOSTRAS DE SOLO

A viagem a campo foi definida juntamente com uma equipe da empresa parceira, INVENTO GEOSOLUÇÕES LTDA [71], tendo duração de dois dias. Os pontos foram escolhidos com base nas informações obtidas na seção anterior, em particular nas Imagens das Figuras 43a e 43b. Essas regiões foram escolhidas por apresentarem possíveis afloramentos de óxido de ferro e anomalias magnéticas intensas ao redor. Os três pontos visitados estão indicados na Figura 47.

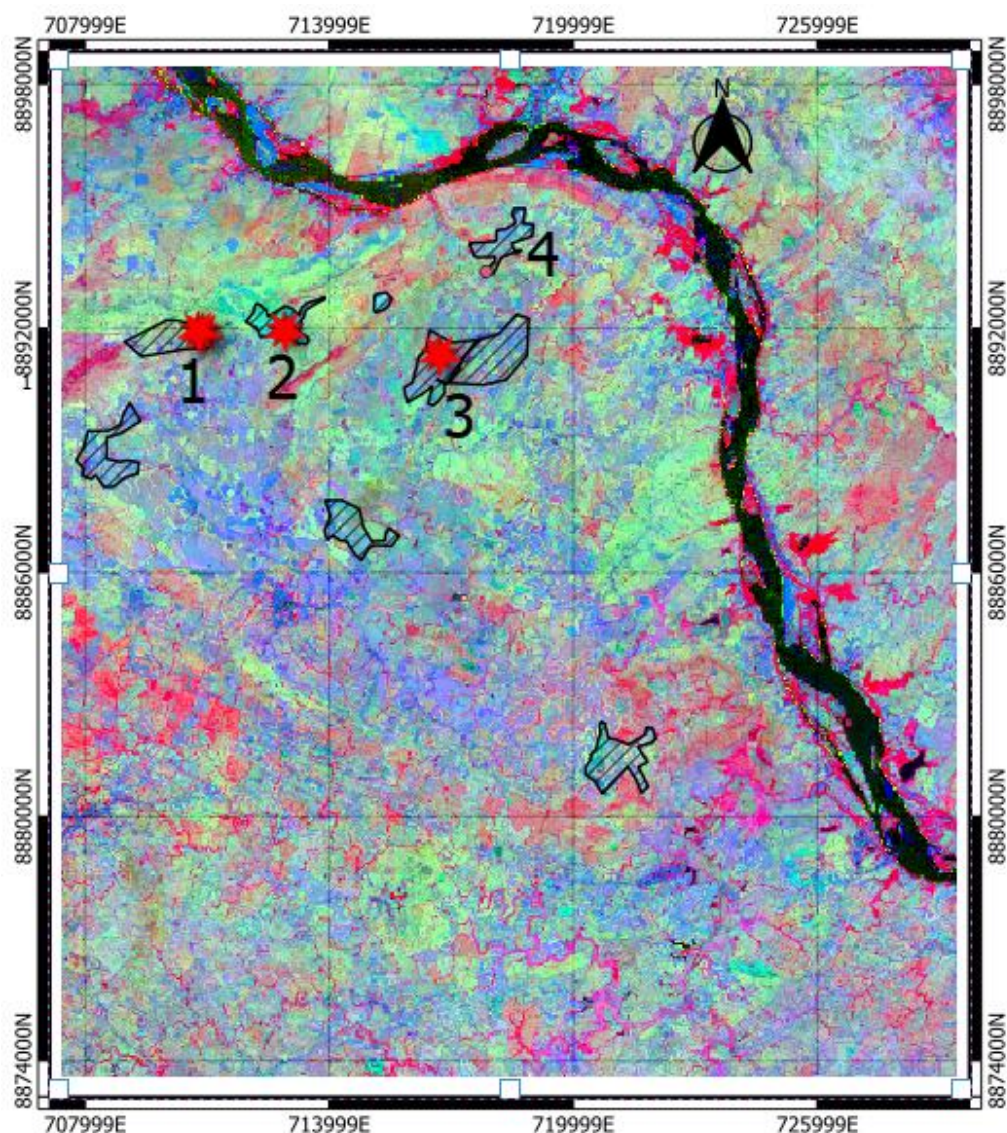


Figura 47: Áreas visitadas, pontos 1, 2 e 3, sobrepostas a composição apresentada na Figura 43, no ponto 4 foi feito o voo com o VANT.

Na Figura 48 são exibidas as fotografias das três amostras coletadas. Os profissionais da empresa também selecionaram uma região para realização do voo com o VANT no ponto 4, visando a obtenção de imagens com maior detalhamento do solo. O material coletado em campo, passou por um processo de moagem e homogeneização, para que fossem submetidas a procedimentos de análise elementar por FRX e mineralógica por DRX.

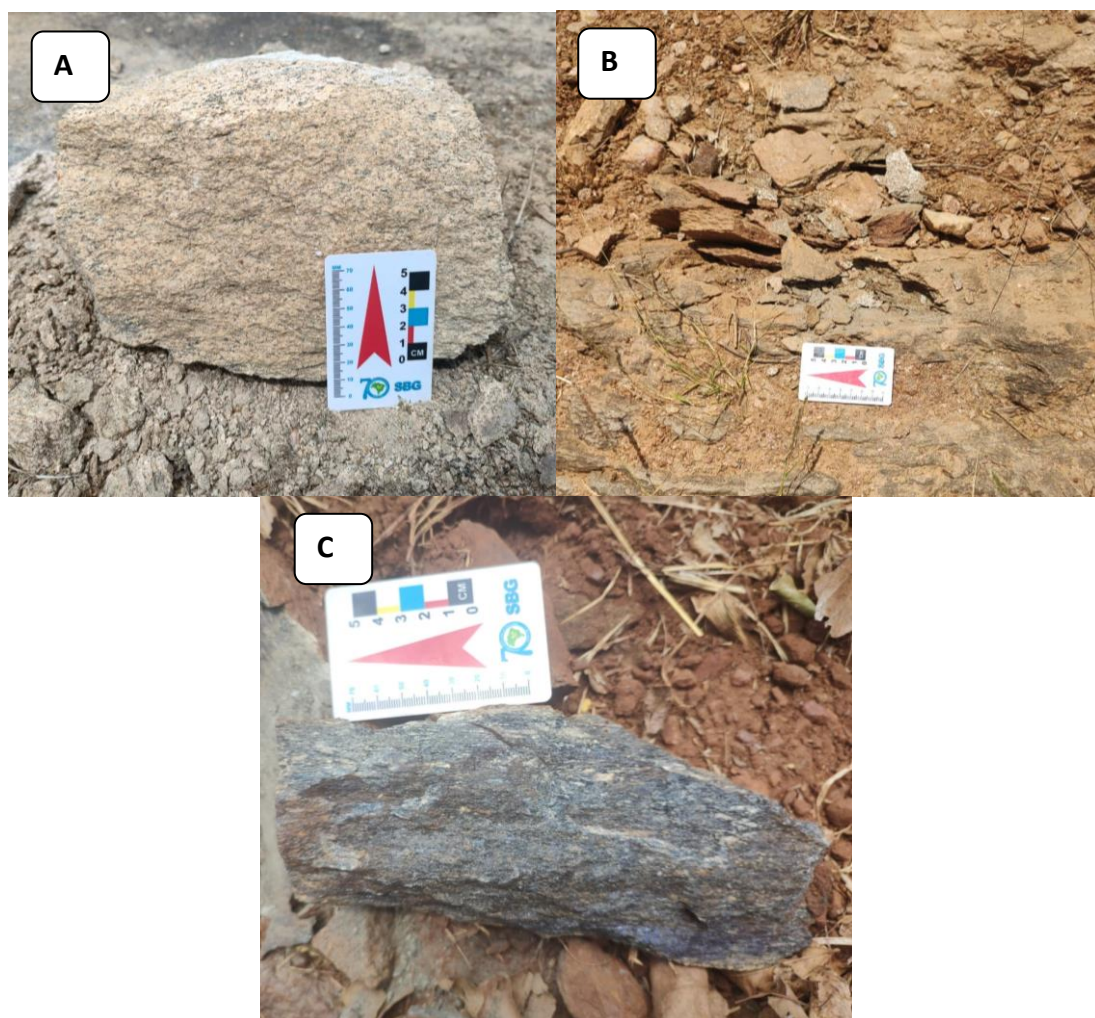


Figura 48: Fotografia in-situ das amostras coletadas em campo na região de Gararu/SE, a) Granitoide da região 1, b) Xisto da região 2 e c) Rocha ultramáfica da região 3.

Na Tabela 4 é apresentada a lista de elementos químicos e respectivas porcentagens atômicas das três amostras analisadas. Para uma melhor visualização comparativa, também foi feito um gráfico tipo pizza apresentado na Figura 49. Os resultados obtidos indicam o Si com maior percentual em todas as amostras, apresentando valores entre 37% e 58%. As amostras coletadas nas regiões 1 e 2 apresentaram maior similaridade, tendo o Al como segundo elemento mais abundante, com porcentagem de 17% e 24%, respectivamente, seguidos pelo K e o Fe. A amostra coletada na região 3 teve o Fe como segundo elemento mais abundante, seguido pelo Ca e Al. Note que todas as amostras apresentaram uma porcentagem significativa de Fe, corroborando com os resultados obtidos na seção anterior, na qual o espectro dos minérios de Fe era rastreado para a formação das imagens.

Tabela 4: Porcentagem atômica dos elementos encontrados, através da técnica de FRX.

Elementos detectados	Amostra 1 (atom%)	Amostra 2 (atom%)	Amostra 3 (atom%)
Fe	3.75	10.21	22.46
Ti	0.90	1.37	3.30
Ca	3.16	1.83	15.39
K	11.66	9.97	0.76
P	0.23	0.26	0.26
Si	57.70	48.33	37.65
Al	17.24	23.03	13.39
Mg	0.77	3.77	4.22
Na	4.35	1.09	2.09
Sr	0.20	0.02	0.10
Mn	0.05	0.12	0.37

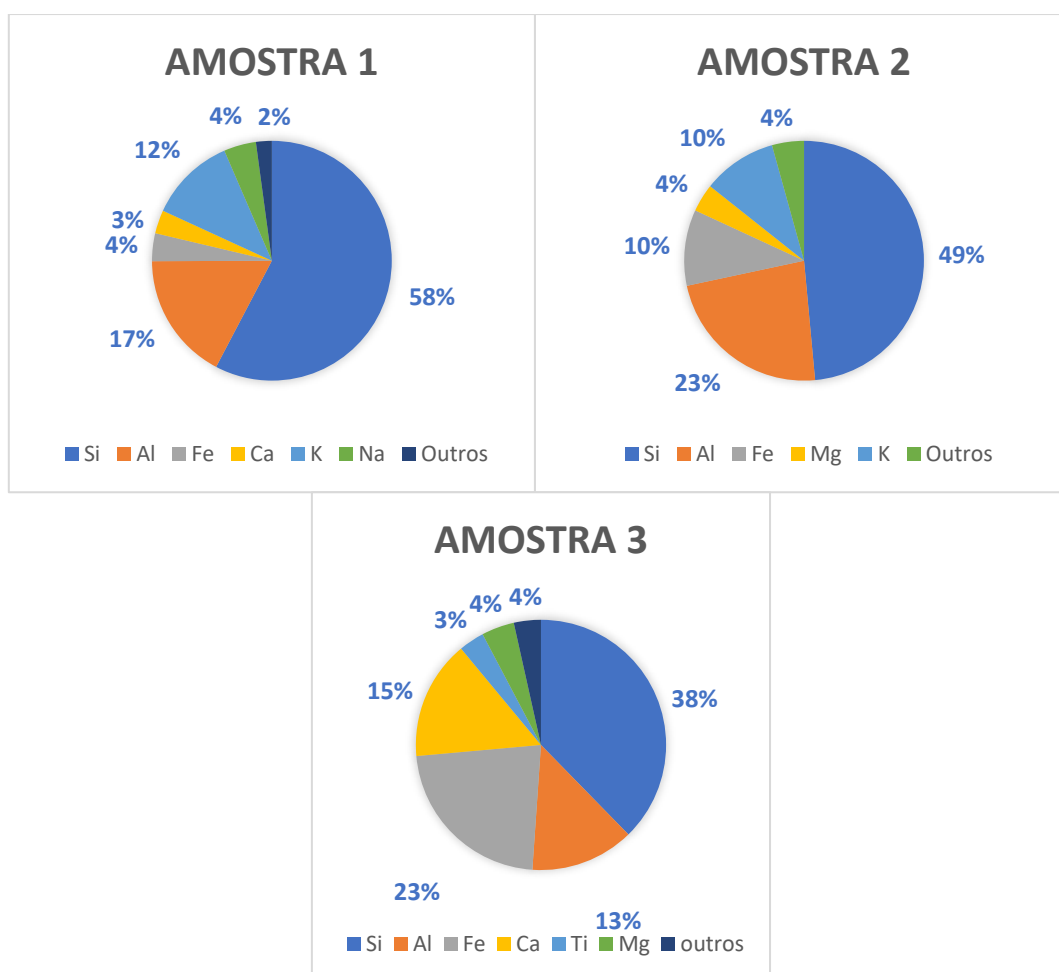


Figura 49: Gráficos de composição elementar para as amostras coletadas no domínio Macururé nas regiões: a) 1; b) 2; e c) 3.

Análises de DRX foram realizadas para auxiliar na descrição mineralógica das rochas encontradas nas regiões visitadas. Na Figura 50 são apresentados os difratogramas de raios X das três amostras analisadas. Para a região 1 (Figura 50a) os picos identificados foram associados a dois tipos de óxidos de silício (SiO_2) do tipo quartzo, e feldspatos alcalinos do tipo ortoclásico (KAlSi_3O_8). Nesta região foram observadas tonalidades para minerais ferrosos (Figura 43), porém com baixa intensidade magnética (Figura 46). Conforme os resultados de FRX, a quantidade de Fe nesta amostra é pequena (3,75%) quando comparada com os elementos dominantes ($\text{Si}+\text{K}+\text{Al} \sim 87\%$), dessa forma, acreditamos que nesta amostra o Fe detectado nas imagens espectrais deva estar diluído nos minérios dominantes ao invés de separado como o SiO_2 e o KAlSi_3O_8 .

Na região 2 foram observadas variações de tons que representam óxidos de ferro e minerais ferrosos, e está na borda de uma anomalia magnética. Os resultados obtidos na FRX indicam que a rocha coletada possui maior composição de Si, Al e Fe. Por meio dos resultados de DRX (Figura 50b) foram identificados os minérios quartzo (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4). Portanto, a presença do Fe identificado por XRF e da magnetita identificada por DRX corroboram com o mapa espectral apresentado na Figura 43 para esta região.

Finalmente, no difratograma de raios X (Figura 50c) da amostra da região 3 foram identificados dois tipos de quartzo (SiO_2 – monoclinico e hexagonal) e o amfibólitos do tipo Ferrotschermakite ($\text{Ca}_2\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{Al}_2)\text{O}_{22}(\text{OH})_2$). Este resultado também corrobora com os anteriormente apresentados, que indicam que dentre as três coletadas, essa foi a que apresentou maior porcentagem de ferro segundo o resultado da FRX, e as composições coloridas (Figuras 43a e 43b) cujas tonalidades de cores e anomalias magnéticas sugeriram a presença de óxido de ferro e minerais ferrosos.

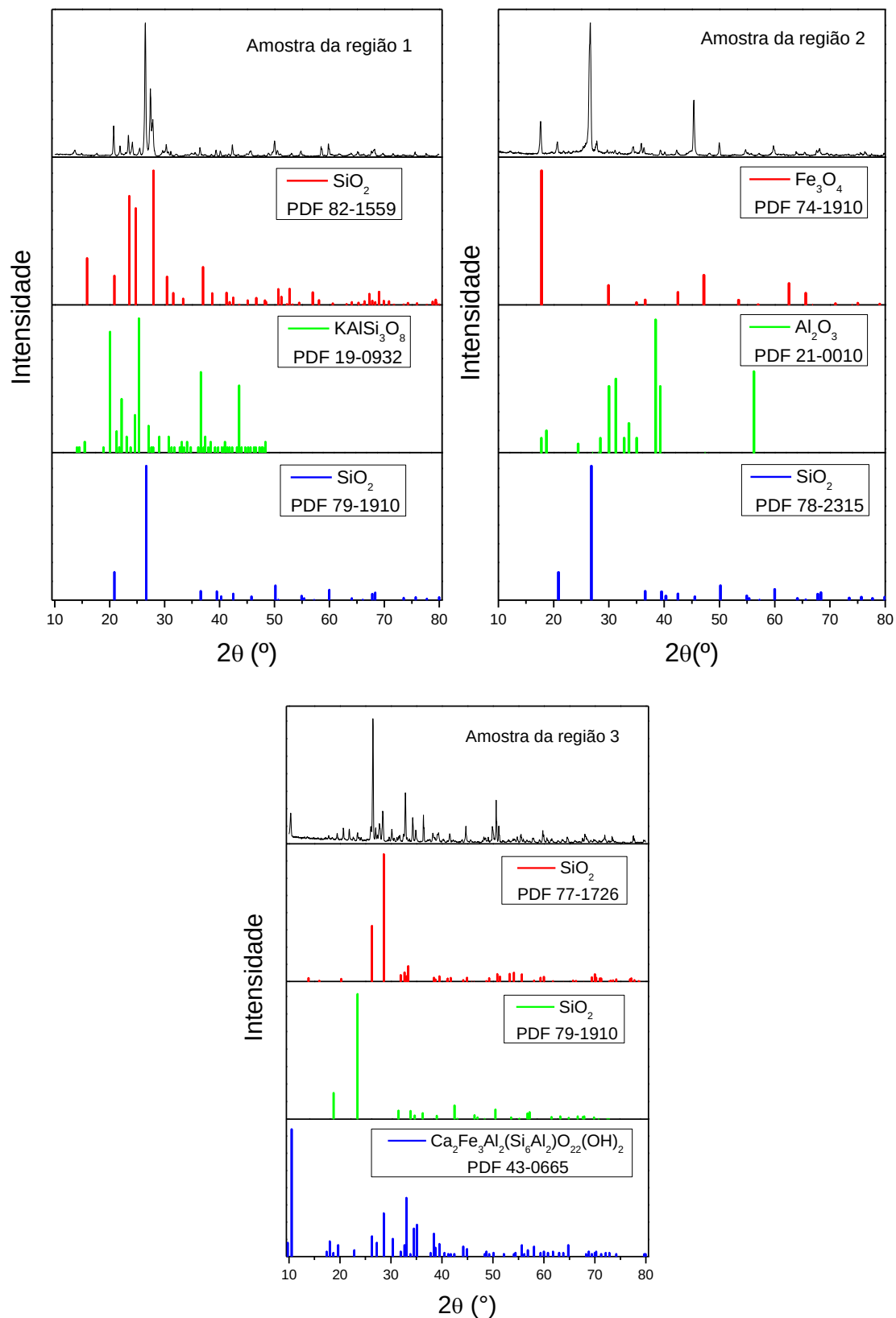


Figura 50: Difratogramas de raios X das amostras coletadas nas regiões a) 1; b) 2; e c) 3. Foram identificadas as três fases com maior ocorrência.

Capítulo 6

Conclusão

6.1. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados nos permitem concluir que a metodologia desenvolvida foi eficiente para a verificação da composição da superfície terrestre por meio da aplicação dos métodos em imagens de satélites multiespectrais. Foram construídos mapas para as duas regiões estudadas, identificando com padrões de cores os minerais ferrosos e óxidos de ferro.

Na região de Canindé de São Francisco, usada como referência, as jazidas de ferro conhecidas, foram identificadas por meio dos dados multiespectrais e magnéticos. Usando o método desenvolvido no presente trabalho, os resultados foram confirmados com os dados disponíveis no mapa geológico do Estado de Sergipe. Está análise permitiu validar o método e na sequência fazer sua aplicação para a região de Gararu.

Para a região de Gararu o mesmo método de análise foi aplicado e os mesmos minérios presentes na região de Canindé também foram identificados. Porém, como não há informações sobre a presença de jazidas de ferro na região, a confirmação da composição química das jazidas foi feito coletando amostras de rochas aflorantes. Todos os materiais coletados indicavam a presença de óxidos de ferro e minerais ferrosos, corroborando com a análise feita por meio dos dados espectrais e magnéticos. O único ponto que não havia indicação de anomalia magnética apresentou baixa porcentagem de ferro. Os demais pontos apresentaram teores de Fe de 10% (região sobre a borda uma anomalia magnética) e 22% (região sobre uma anomalia magnética).

Finalmente, foi possível minimizar os custos referentes a exploração realizando visitas a campo, evitando assim a degradação de regiões ambientais diminuindo os riscos para o pesquisador e possibilitando a análise de uma região extensa num curto período de tempo.

Capítulo 7

Sugestões para trabalhos futuros

7.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a otimização dos resultados apresentados no presente trabalho, sugerimos as seguintes etapas:

- Utilização de dados de satélites com câmeras hiperespectrais, as quais podem fornecer um maior detalhamento da mineralogia regional.
- A utilização de um software pago. O software utilizado é grátis e em vários momentos impossibilitou a aplicação de outras técnicas mais avançadas de análise.
- Fazer um trabalho mais detalhado das anomalias magnéticas, para verificação direta da relação entre elas e os minérios de ferro.
- Realizar missões com VANTs com câmeras hiperespectrais acopladas para obter maiores detalhamentos em áreas de difícil acesso.

Capítulo 8

Referências bibliográficas

8.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

-
- 1 MENESES, Paulo Roberto; ALMEIDA, Tati. **Introdução Ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: Unb, 2012.
 - 2 CABRAL, Esicleide Gomes et al. **A silvicultura do eucalipto no estado de Goiás: um registro histórico via sensoriamento remoto**. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 39, 2019.
 - 3 DE SOUSA, Henrique Lima. **Sensoriamento Remoto com VANTs: uma nova possibilidade para a aquisição de geoinformações**. Revista Brasileira de Geomática, v. 5, n. 3, p. 326-342, 2017.
 - 4 TOMZHINSKI, Gustavo Wanderley Tomzhinski; COURA, Pedro Henrique Ferreira; DO COUTO FERNANDES, Manoel. **Avaliação da detecção de focos de calor por sensoriamento remoto para o Parque Nacional do Itatiaia**. Biodiversidade Brasileira-BioBrasil, n. 2, p. 201-2011, 2011.
 - 5 SCHÄFER, Alexandro Gularte; VIEIRA, Heitor; LOCH, Ruth Emilia Nogueira. **Utilização do sensoriamento remoto em projetos rodoviários no Brasil: um histórico**. 2006.
 - 6 GUEDES, Jânio; DA SILVA, Sebastião Milton Pinheiro. **SENSORIAMENTO REMOTO NO ESTUDO DA VEGETAÇÃO: PRINCÍPIOS FÍSICOS, SENSORES E MÉTODOS**. 2018.
 - 7 ALMEIDA, Arlete Silva de; VIEIRA, Ima Célia Guimarães. **Dinâmica da cobertura vegetal e uso da terra no município de São Francisco do Pará (Pará, Brasil) com o uso da técnica de sensoriamento remoto**. Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Ciências Naturais, 2008.
 - 8 SOUZA, Celso Coelho de et al. **Técnicas de sensoriamento remoto como subsídios aos estudos de florestas implantadas no Brasil-Uma revisão bibliográfica**. Ciência Florestal, v. 17, p. 409-417, 2007.
 - 9 **LANDSAT - Land Remote Sensing Satellite**. Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/landsat>. Acesso em: 22 dez. 2022.
 - 10 **SENTINEL - Missão Sentinel**. Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/sentinel>. Acesso em: 22 dez. 2022.
 - 11 **CBERS - China-Brazil Earth Resources Satellite ou Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres**. Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/cbers>. Acesso em: 22 dez. 2022.

-
- 12 FERNEDA, Gabriel. **Do tamanho da cidade de SP: iceberg gigante se desprende da Antártica**. CNN Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/do-tamanho-da-cidade-de-sp-iceberg-gigante-se-desprende-da-antartica/>. Acesso em: 25 jan. 2023.
- 13 **Iceberg gigante do tamanho da cidade de SP se desprende da Antártica**. G1, 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2023/01/25/video-iceberg-gigante-do-tamanho-da-cidade-de-sp-se-desprende-da-antartica.ghtml>. Acesso em: 25 jan. 2023.
- 14 JACKISCH, Robert et al. **Drone-borne hyperspectral and magnetic data integration: Otanmäki Fe-Ti-V deposit in Finland**. Remote sensing, v. 11, n. 18, p. 2084, 2019.
- 15 FIGUEIREDO, Divino. **Conceitos básicos de sensoriamento remoto**. São Paulo, 2005.
- 16 NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 2010. 387 p.
- 17 NISHIDA, Waleska et al. **Uma rede neural artificial para classificação de imagens multiespectrais de sensoriamento remoto**. 1998.
- 18 DE MORAES, Elisabete Caria. **Capítulo 1 fundamentos de sensoriamento remoto**. 2002.
- 19 JACKSON, John David. **Classical electrodynamics**. John Wiley & Sons, 2021.
- 20 Sebastião, D., Branco, M., Oliveira, C., & Correia, L. M. **Fontes de Radiação Eletromagnética** (atualização LTE). *Lâmpada*, 60, 0-5.
- 21 CARDOSO, Simone Coutinho et al. **Rápida introdução à Física das Radiações**. 2021.
- 22 LADEIA, CRISLAINE ALVES. **USO DE SENSORES ATIVOS E PASSIVOS NA ESTIMATIVA DE TEORES DE NITROGÊNIO E DO DESENVOLVIMENTO FITOTÉCNICO E PRODUTIVO DO CAFEIEIRO**. 2020.
- 23 CROSTA, Alvaro Penteado. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. UNICAMP/Instituto de Geociências, 1999.
- 24 RAMOS, Diego Vieira et al. **Técnicas de sensoriamento remoto empregadas nos estudos urbanos**. Synergismus scyentifica UTFPR, v. 12, n. 1, p. 269-278, 2017.
- 25 LATORRE, Marcelo Lopes et al. **Correção atmosférica: conceitos e fundamentos**. 2002.

26 PINA, Agenor Pina; SILVA, Luciano Fernandes; OLIVEIRA, Zolacir T. **Mudanças Climáticas: reflexões para subsidiar esta discussão em aulas de Física.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 27, n. 3, p. 449-472, 2010.

27 FURLANETTO, R. H. et al. **Potencial de utilização de sensores multiespectral e hiperespectral no estudo de diferentes alvos agrícolas.** 2017.

28 **Resolution and Swath.** ESA Sentinel Online, 2023. Disponível em: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload/resolution-and-swath>. Acesso em: 20 nov. 2022.

29 **USGS EROS Archive - Earth Observing One (EO-1) - Hyperion.** ESA Sentinel Online: EARTH RESOURCES OBSERVATION AND SCIENCE (EROS) CENTER, 17 abr. 2019. Disponível em: USGS EROS Archive - Earth Observing One (EO-1) - Hyperion. Acesso em: 20 nov. 2022.

30 Felipe-García, B., Hernández-López, D. & Lerma, JL **Análise da distância amostral do solo em grandes levantamentos fotogramétricos.** *Appl Geomat* 4, 231–244 (2012). <https://doi.org/10.1007/s12518-012-0084-2>

31 GIOVANINI, Adenilson. **GSD: o que é e quais valores utilizar?** Disponível em: <https://adenilsongiovannini.com.br/blog/gsd-descubra-o-que-e/>. Acesso em: 10 dez. 2022.

32 DUTRA, Andeise Cerqueira. **Mapeamento e monitoramento da cobertura vegetal do estado da Bahia utilizando dados multitemporais de sensores ópticos orbitais.** CEP, v. 12, p. 010, 2019.

33 FORMAGGIO, Antonio Roberto; SANCHES, Ieda Del'Arco. **Sensoriamento remoto em agricultura.** Oficina de Textos, 2017.

34 SHIRATSUCHI, Luciano Shozo et al. **Sensoriamento remoto: conceitos básicos e aplicações na agricultura de precisão.** 2014.

35 GOMES, Daniel Fernandes. **Uso de imagens Sentinel-2 na identificação de áreas com infestação do capim-annoni-2 no Complexo Eólico Cerro Chato, Santana do Livramento, RS.** 2017.

36 **Arquivo USGS EROS - Sentinel-2.** USGS Science for a changing world: Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, 16 jul. 2018. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-sentinel-2>. Acesso em: 27 dez. 2022.

37 **Novo skywalker 1900.** Skywalker, 2015. Disponível em: <http://skywalkermodel.com/en/91.html#inspire-1-pro-overview-s5>. Acesso em: 27 dez. 2022.

-
- 38 FRANZINI, Marica et al. **Consistência geométrica e radiométrica de imagens multiespectrais de papagaio sequóia para aplicações de agricultura de precisão**. Ciências Aplicadas, v. 9, n. 24, pág. 5314, 2019.
- 39 **QGroundControl**: Estação de controle terrestre intuitiva e poderosa para o protocolo MAVLink.. Dronecode, 2019. Disponível em: <http://qgroundcontrol.com/>. Acesso em: 27 dez. 2022.
- 40 NAPOLITANO, Hamilton B. et al. **Análise da difração dos Raios X**. Revista Processos Químicos, v. 1, n. 1, p. 35-45, 2007.
- 41 BLEICHER, Lucas; SASAKI, José Marcos. **Introdução à difração de raios-xem cristais**. Universidade Federal do Ceará, p. 1-20, 2000.
- 42 ALBERS, Ana Paula F. et al. **Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X**. Cerâmica, v. 48, p. 34-37, 2002.
- 43 CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- 44 SANTOS, Elenir et al. **Espectrometria de fluorescência de raios-X na determinação de espécies químicas**. Enciclopédia biosfera, v. 9, n. 17, 2013.
- 45 SIMABUCO, SILVANA MOREIRA. **Emprego da fluorescência de raios X por dispersão de energia no estudo da dinâmica da vinhaça no solo**. São Paulo: IPEN/CNENUSP, 1993.
- 46 WASTOWSKI, Arci Dirceu et al. **Caracterização dos níveis de elementos químicos em solo, mantidos a diferentes sistemas de uso e manejo, utilizando espectrometria de fluorescência de raios-x por energia dispersiva (EDXRF)**. Química Nova, v. 33, p. 1449-1452, 2010.
- 47 Teixeira, W. G., VASQUES, G. D. M., & Nogueira, J. (2017). **Uso de espectrômetro de fluorescência de raios x portátil (PXRF) para avaliação de teores de ferro e manganês em amostras de solo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 16., 2017, Armação dos Búzios. Anais... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geoquímica, 2017.
- 48 **XRF-1800: Espectrômetro Sequencial de Fluorescência de Raios X por Comprimento de Onda**. Shimadzu Excellence in Science, 2021. Disponível em: https://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/elemental/raios_x/xrf/xrf-1800.shtml. Acesso em: 23 jan. 2023.
- 49 **EARTHEXPLORERNAME**. USGS Science for a changing world. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 23 nov. 2022.
- 50 **USGS Sentinel-2 Data Archive Ends Soon: New data collection will stop October 19**. USGS Science for a changing world: Earth Resources Observation

and Science (EROS) Center, 29 set. 2022. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/eros/news/usgs-sentinel-2-data-archive-ends-soon>. Acesso em: 5 dez. 2022.

51 **WELCOME to the Copernicus Open Access Hub**. Copernicus, 2014. Disponível em: <https://scihub.copernicus.eu/>. Acesso em: 5 dez. 2022.

52 **MDE - Modelo Digital de Elevação**. IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/modelos-digitais-de-superficie/modelos-digitais-de-superficie/10856-mde-modelo-digital-de-elevacao.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 7 dez. 2022.

53 **ASF Data Search: EarthData**. IBGE, 2014. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/#/>. Acesso em: 7 mar. 2022.

54 CARRINO, Thais Andressa; SOUZA FILHO, Carlos Roberto de; LEITE, Emilson Pereira. **Processamento e integração de imagens multiespectrais, de radar e aerogeofísicas do bloco serra leste (Carajás, PA) e discussão do potencial para mineralização de ferro**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 26, p. 123-140, 2008.

55 MELO, Danilo Heitor Caires Tinoco Bisneto et al. **Decifrando o georreferenciamento**. Geografia Ensino & Pesquisa, p. 85-102, 2014.

56 FRIGERI, João Vitor. **Avaliação de metodologia para inventário de uva-do-Japão (Hovenia dulcis Thunb.) utilizando imagens de veículos aéreos não tripulados (VANT) na UTFPR-campus Dois Vizinhos**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

57 FURLANETTO, Renato Herrig. **Sensores multi e hiperespectrais na identificação e quantificação da deficiência de potássio na cultura do milho (Zea mays)**. 2018.

58 SAMPAIO, M. R. C. **Interpretação e modelagem de dados geofísicos no embasamento adjacente à bacia de Sergipe-Alagoas**. Trabalho de Graduação em Geofísica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil, 2019.

59 PERROTTA, Mônica Mazzini et al. **Mapeamento hiperespectral de associações minerais relacionadas ao depósito de ouro de Pedra Branca, maciço de Troia, Ceará**. 2018. Tese de Doutorado.

60 GAIDA, William et al. **Correção atmosférica em sensoriamento remoto: uma revisão**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 13, n. 01, p. 229-248, 2020.

61 CANDIAGO, Sebastian et al. **Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images**. Remote sensing, v. 7, n. 4, p. 4026-4047, 2015.

-
- 62 PETTORELLI, Nathalie et al. **Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change.** Trends in ecology & evolution, v. 20, n. 9, p. 503-510, 2005
- 63 CASARI, Gabriel Henrique das Chagas Noqueli. **Estimativa de biomassa por sensoriamento remoto: um potencial para avaliação da produção de energia.** 2018.
- 64 SANTANA, Sidney Henrique Campelo de. **Análise da biomassa florestal de Pinus uncinata por meio de ferramentas de sensoriamento remoto passivo e ativo.** 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- 65 BEIRANVAND POUR, Amin; HASHIM, Mazlan. **ASTER, ALI and Hyperion sensors data for lithological mapping and ore minerals exploration.** SpringerPlus, v. 3, p. 1-19, 2014.
- 66 RAJAN GIRIJA, Rejith; MAYAPPAN, Sundararajan. **Mapping of mineral resources and lithological units: A review of remote sensing techniques.** International Journal of Image and Data Fusion, v. 10, n. 2, p. 79-106, 2019.
- 67 RAMADAN, Talaat M. et al. **Application of remote sensing in exploration for uranium mineralization in Gabal El Sela area, South Eastern Desert, Egypt.** The Egyptian Journal of remote sensing and Space science, v. 16, n. 2, p. 199-210, 2013.
- 68 ADIRI, Zakaria et al. **Recent advances in the use of public domain satellite imagery for mineral exploration: A review of Landsat-8 and Sentinel-2 applications.** Ore Geology Reviews, v. 117, p. 103332, 2020.
- 69 DUCART, D. F. et. Al. **Mapping iron oxides with Landsat-8/OLI and EO-1/Hyperion imagery from the Serra Norte iron deposits in the Carajás Mineral Province, Brazil.** Brazilian Journal of Geology. v. 46, n. 3, 2016, pp. 331-349.
- 70 POURNAMDARI, Mohsen; HASHIM, Mazlan. **Detection of chromite bearing mineralized zones in Abdasht ophiolite complex using ASTER and ETM+ remote sensing data.** Arabian Journal of Geosciences, v. 7, p. 1973-1983, 2014.
- 71 MBIANYA, Ghislain Ngassam et al. **Remote sensing satellite-based structural/alteration mapping for gold exploration in the Ketté goldfield, Eastern Cameroon.** Journal of African Earth Sciences, v. 184, p. 104386, 2021.
- 72 TRAORE, Mamadou et al. **Lithological and alteration mineral mapping for alluvial gold exploration in the south east of Birao area, Central African**

Republic using Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) data. Journal of African Earth Sciences, v. 170, p. 103933, 2020.

73 AMARA, Baya Nait et al. **Hydrothermal alteration mapping and structural features in the Guelma basin (Northeastern Algeria): contribution of Landsat-8 data.** Arab J Geosci, v. 12, n. 3, p. 1-14, 2019.

74 TELES, Marcos Rogérios Lima. **ATLAS AEROGEOFÍSICO DO ESTADO DE SERGIPE: LEVANTAMENTO GEOLÓGICO E DE POTENCIAL MINERAL DE NOVAS FRONTEIRAS.** Salvador: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2019. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/21418>.

75 **QGIS: Um Sistema de Informação Geográfica livre e aberto.** Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/index.html.

76 **Invento Geosoluções.** Disponível em: <https://www.geoinvento.com.br/>.

77 **Malha municipal.** IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=downloads>.

78 SANTOS, Reginaldo Alves dos et al. **Geologia e recursos minerais do estado de Sergipe.** 1998.

79 CAXITO, Fabrício; DIAS, Tatiane Gonçalves. **Ferro.** Recursos Minerais de Minas Gerais - RMMG, 2021. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/ferro/>. Acesso em: 14 nov. 2022.

80 **IRON Ore Statistics and Information: Statistics and information on the worldwide supply of, demand for, and flow of the mineral commodity iron ore.** USGS Science for a changing world: National Minerals Information Center, 2021. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/iron-ore-statistics-and-information>. Acesso em: 14 out. 2022.

81 Andrey Bekker, John F. Slack, Noah Planavsky, Bryan Krapež, Axel Hofmann, Kurt O. Konhauser, Olivier J. Rouxel; **Iron Formation: The Sedimentary Product of a Complex Interplay among Mantle, Tectonic, Oceanic, and Biospheric Processes.** *Economic Geology* 2010; 105 (3): 467–508. doi: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.467>

82 HENRIQUES, Andréia Bicalho. **Caracterização e estudo das propriedades eletrocinéticas dos minerais de ferro: hematita, goethita e magnetita.** 2012.

83 ABREU, Marcio Antonio de Alcantara et al. **Síntese e caracterização da magnetita obtida a partir de rejeito de Bauxita da mina de Juruti, Pará, Brasil.** 2017. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Oeste do Pará.

84 CORDEIRO, Patrícia Ribas. **TRANSFORMAÇÕES TOPOTAXIAIS E CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MORFOLÓGICA DE ÓXIDOS E HIDRÓXIDOS DE FERRO**. 2016. TCC (Superior, Geologia) - Universidade federal do paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <http://www.geologia.ufpr.br/portal/wp-content/uploads/2018/10/Patr%C3%ADcia-Ribas-Cordeiro-TCC.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2023.

85 TEIXEIRA, Léo Rodrigues. **MAPA GEOLÓGICO E DE RECURSOS MINERAIS DO ESTADO DE SERGIPE**. Repositório Institucional de Geociências - CPRM, 2014. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/21619/1/mapa_geologico_se.pdf. Acesso em: 20 jan. 2022.

86 DEMATTÊ, José Alexandre M. et al. **Comparação entre mapas de solos obtidos por sensoriamento remoto espectral e pelo método convencional**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 39, p. 1219-1229, 2004.

87 PIZARRO, Marco Antonio; EPIPHANIO, José Carlos Neves; GALVÃO, Lênio Soares. **Caracterização mineralógica de solos tropicais por sensoriamento remoto hiperespectral**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 36, p. 1277-1286, 2001.

88 MACHADO, Marília Teresinha de Sousa; BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello. **Sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água do Lago Paranoá (DF)**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 21, p. 357-365, 2016.

89 PEIXOTO, Daniela Wancura Barbieri. **Caracterização da variação temporal de sólidos em suspensão da água em PCHs no rio Ivaí-RS a partir de dados limnológicos e de sensoriamento remoto**. 2018.