UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DE IDENTIFICAÇÃO DA LEUCAENA LEUCOCEPHALA (LAM.) DE WIT. ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO:
Uma análise técnica de monitoramento ambiental na Bacia do Ribeirão Claro

Pedro Botasso do Valle

Orientadora: Prof(a).Dr(a). Lucilia do Carmo Giordano

Rio Claro (SP)
2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

PEDRO BOTASSO DO VALLE

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DE IDENTIFICAÇÃO DA LEUCAENA LEUCOCEPHALA (LAM.) DE WIT. ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO:

Uma análise técnica de monitoramento ambiental na Bacia do Ribeirão Claro

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Rio Claro - SP

2025

V181a

Valle, Pedro Botasso

Avaliação da viabilidade de identificação da Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit. através de técnicas de sensoriamento remoto: : uma análise técnica de monitoramento ambiental na Bacia do Ribeirão Claro / Pedro Botasso Valle. -- Rio Claro, 2025

87 p. : tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientadora: Lucilia do Carmo Giordano

1. Sensoriamento Remoto. 2. Análise espectral. 3. Imagens multiespectrais. 4. Invasões biológicas. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A pesquisa busca contribuir para o avanço metodológico do Sensoriamento Remoto aplicado à identificação de espécies invasoras.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, um dos objetivos técnicos conquistado foi a aplicação do modelo 6S e a conversão dos números digitais da imagem do satélite CBERS-4A para valores de reflectância, reforçando a literatura referente à correção atmosférica para o sensor, através de um processo padronizado.

Os resultados obtidos no mapeamento da *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. oferecem subsídios relevantes para compreender o grau de invasão biológica na bacia hidrográfica do Ribeirão Claro para apoiar ações de contenção e manejo ambiental.

O método proposto possui potencial em orientar políticas públicas, especialmente no planejamento territorial e na tomada de decisão por órgãos municipais e estaduais, por se tratar de um procedimento de baixo custo, replicável e baseado em dados orbitais gratuitos.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The research seeks to contribute to the methodological advancement of Remote Sensing applied to the identification of invasive species.

During the development of this work, one of the technical objectives that was achieved was the application of the 6S model and the conversion of the digital numbers from the CBERS-4A satellite image to reflectance values, reinforcing the literature on atmospheric correction for the sensor through a standardized process.

The results obtained in the mapping of *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. provide relevant support for understanding the degree of biological invasion in the Ribeirão Claro watershed, supporting containment actions and guiding environmental management strategies. Furthermore, they enable the early detection of the species expansion, promoting the preservation of native vegetation fragments and contributing to the restoration of degraded areas.

The proposed method also has the potential to guide public policies, particularly in territorial planning and decision-making by municipal and state agencies, especially considering that it is a low-cost, replicable procedure based on free orbital data.

PEDRO BOTASSO DO VALLE

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DE IDENTIFICAÇÃO DA LEUCAENA LEUCOCEPHALA (LAM.) DE WIT. ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO:

Uma análise técnica de monitoramento ambiental na Bacia do Ribeirão Claro

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Comissão Examinadora

Orientadora: Prof(a).Dr(a). Lucilia do Carmo Giordano

Prof(a).Dr(a). Claudia Vanessa dos Santos Côrrea

Prof. Dr. Danilo Marques de Magalhães

Rio Claro, 09 de dezembro de 2025.

Assinatura do(a) aluno(a)

gov.br Documento assinado digitalmente
PEDRO BOTASSO DO VALLE
Data: 09/12/2025 23:44:37-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Assinatura do(a) orientador(a)

gov.br Documento assinado digitalmente
LUCILIA DO CARMO GIORDANO
Data: 10/12/2025 18:32:11-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde e pela oportunidade de viver cada dia, permitindo-me avançar e alcançar conquistas ao longo dessa trajetória.

À minha família, que sempre me apoiou nos desafios que escolhi enfrentar e me proporcionou as condições necessárias para iniciá-los, expresso minha profunda gratidão. Dedico este trabalho a vocês, que investiram tempo, recursos e afeto com o único propósito de ver meu progresso acadêmico e pessoal.

Dedico também este trabalho – e especialmente este parágrafo – à minha namorada, Júlia Romoda, que esteve ao meu lado durante toda a graduação. Sua presença me ofereceu equilíbrio, confiança e serenidade, contribuindo para que eu me tornasse uma pessoa mais segura, resiliente e feliz. Sua parceria foi fundamental para que eu me mantivesse firme ao longo dessa jornada.

Aos meus amigos de graduação: "Desamados", agradeço pela convivência diária, pelo apoio nas disciplinas, pelos momentos compartilhados, pelas conversas e pelo companheirismo. Ao longo dos anos, desenvolvi grande admiração e orgulho por cada um de vocês, e tenho convicção de que esta graduação representa apenas o início de nossas conquistas.

Agradeço também ao meu amigo e desenvolvedor *front-end,* André Biaggio, que tirou horas de seu dia para me ensinar os fundamentos de Python e que me orientou para elaboração do *script* em Py6S.

Finalmente, agradeço aos meus professores, cuja dedicação ao ensino tornou possível esta caminhada acadêmica. Em especial, registro meu reconhecimento à minha tutora, Prof.ª Dr.ª Lucilia do Carmo Giordano, por acreditar no meu potencial, incentivar meu desenvolvimento e confiar plenamente na minha capacidade para a realização deste trabalho.

“Ler fornece ao espírito materiais para o conhecimento, mas só o pensar faz nosso o que lemos.”
(LOCKE, J. An Essay Concerning Human Understanding. London: Tegg, 1829.).

RESUMO

O Brasil abriga 38.615 espécies de plantas vasculares, das quais 52% são endêmicas. Parte dessa riqueza biológica encontra-se ameaçada em razão do avanço das invasões biológicas. Entre elas, destaca-se a *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. Este estudo investigou o uso de técnicas de Sensoriamento Remoto e sistemas de informações geográficas para identificar e mapear a invasão da espécie *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. na bacia hidrográfica do Ribeirão Claro, no estado de São Paulo. Foram utilizadas imagens do satélite CBERS-4A, submetidas à correção atmosférica por meio do modelo 6S aplicado através da ferramenta de código Py6S, baseado em dados atmosféricos específicos, a fim de obter produtos com reflectância adequados para análise espectral. A metodologia envolveu seleção de áreas de referência, extração de amostras representativas e aplicação de um processo de classificação baseado em assinaturas espectrais, com o objetivo de distinguir a leucena de outras formações vegetais presentes na região de estudo. Os resultados demonstraram que a técnica apresenta desempenho satisfatório na identificação de maciços homogêneos da espécie, especialmente em áreas abertas e antropizadas. Por sua vez, a aplicação da correção atmosférica mostrou-se consistente, pela integração de dados atmosféricos locais (aerossóis, vapor d'água, ozônio etc.), ao pré-processamento das imagens e aumentando a confiabilidade da reflectância utilizada, viabilizando o modelo Py6S para análises dessa natureza. Assim, conclui-se que, o Sensoriamento Remoto tem potencial para o monitoramento de espécies invasoras em escala local.

Palavras-chave: assinatura espectral; leucena; CBERS-4A.

ABSTRACT

Brazil is home to 38,615 species of vascular plants, 52% of which are endemic. Part of this biodiversity is threatened by the spread of biological invasions. Among them, *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit stands out. This study investigated the use of remote sensing techniques and geographic information systems to identify and map the invasion of the species *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. in the Ribeirão Claro watershed, located in the state of São Paulo, Brazil. CBERS-4A satellite imagery was used and subjected to atmospheric correction through the 6S model, implemented via the Py6S library, and supported by specific atmospheric datasets, to generate reflectance products suitable for spectral analysis. The methodology included the selection of reference areas, extraction of representative samples, and the application of a classification process based on spectral signatures, aiming to distinguish *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. from other vegetation types in the study region. The results indicated that the technique performs satisfactorily in the identification of homogeneous groups of the species, particularly in open and anthropized areas. On the other hand, the application of atmospheric correction proved to be consistent, through the integration of local atmospheric data (aerosols, water vapor, ozone, etc.) into the pre-processing of images and increasing the reliability of the reflectance values used, enabling the Py6S model for analyses of this nature. Thus, it can be concluded that Remote Sensing has potential for monitoring invasive species on a local scale.

Keywords: spectral signature; leucena.; CBERS-4A.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Obtenção de informações, transferência e elaboração de imagens por Sensoriamento Remoto 19
Figura 2 - Identificação de elementos pelo valor da resolução espacial e contraste 22
Figura 3 - Assinaturas espectrais da vegetação, solo e água sobrepostos às bandas do satélite Landsat 7 24
Figura 4 - Composição colorida Blue, Red e Green do Pantanal de Nhecolândia, MS. 27
Figura 5 - Composição colorida Blue, Red e Green de uma porção de vegetação do Rio Grande do Sul coletadas em datas diferentes: (A) outubro/2002 e (B) março/2003. 28
Figura 6 - Localização da microbacia do Ribeirão Claro, integrada na bacia Hidrográfica do Rio Corumbataí 30
Figura 7 - Valores de AOD 550 nm sobre a bacia hidrográfica do Ribeirão Claro 46
Figura 8 - Valores de Vapor d'água sobre a bacia hidrográfica do Ribeirão Claro 47
Figura 9 - Valores de Ozônio sobre a bacia hidrográfica do Ribeirão Claro 47
Figura 10 - Assinatura espectral leucena a partir de um espectroradiômetro 52
Figura 11 - Composição Infravermelho próximo para destaque de vegetação na cena 53
Figura 12 - Aplicação da função nitidez panorâmica sobre o Horto Florestal Edmundo Navarro de Andrade, Rio Claro – SP 54
Figura 13 - Maciços de leucenas avistados em trabalho de campo no bairro Cidade Jardim 54
Figura 14 - Maciço de leucena no bairro Cidade Jardim, Rio Claro – SP 55
Figura 15 - Maciço de leucena no bairro Assistência, margem da SP-127, Rio Claro – SP 56
Figura 16 - Maciço de leucenas no bairro Assistência, SP-127, Rio Claro – SP 57
Figura 17 - Mapa de classificação de indivíduos da espécie leucena bacia hidrográfica do Ribeirão Claro 61
Figura 18 - Áreas de classificação com resposta positiva a Assinatura Espectral na bacia hidrográfica do Ribeirão Claro 63
Figura 19 - Áreas de classificação com resposta negativa a assinatura espectral na bacia hidrográfica do Ribeirão Claro 65
Figura 20 - Pontos de captura de imagem de áreas de leucena na bacia hidrográfica do Ribeirão Claro 66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Climograma, Rio Claro – SP, 2024. 31
Gráfico 2 - Assinaturas espectrais Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit. 58
Gráfico 3 - Intervalo da Assinatura espectral Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit. 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Divisão do espectro eletromagnético 20
Tabela 2 - Detalhamento dos comprimentos de ondas em relação as cores da região do visível 21
Tabela 3 - Uso e ocupação do solo dentro da sub-bacia do Ribeirão Claro 33
Tabela 4 - Características das câmeras do CBERS-4A 34
Tabela 5 - Parâmetros de calibração e transformação para o sensor WPM/CBERS-4A 38
Tabela 6 - Resultados de constantes de reflectância de topo de atmosfera por banda 49
Tabela 7 - Valores de transmitância e reflectância obtidos através do script programado em Py6S 50
Tabela 8 - Intervalos de variação de valores de pixels de acordo com nível de correção 51
Tabela 9 - Limites e médias por banda da assinatura espectral da Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit. 59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros configuráveis do Py6S 42
Quadro 2 - Definição de valores de parâmetros essenciais para correção atmosférica 48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

5S	Simulação do sinal do satélite no espectro solar
6S	Segunda simulação do sinal do satélite no espectro solar
AOD	Profundidade óptica do aerossol
BRDF	Função de Distribuição de Refletância Bidirecional
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais
CIIAGRO	Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas
DOS	Subtração de Objetos Escuros (Dark Object Subtraction)
ESUN	Irradiânica solar no topo da atmosfera
FRB	Reflectância Bidirecional Aparente
HITRAN	High-resolution Transmission Molecular Absorption Database
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LaSRC	Código de refletância da superfície terrestre
LEDAPS	Sistema de Processamento Adaptativo de Perturbações do Ecossistema Landsat
LGPL	Lesser General Public License
MDE	Modelos Digitais de Elevação
MTR	Modelos de Transferência Radiativa
MUX	Câmera multiespectral
ND	Números Digitais
NIR	Infravermelho próximo
OLI	Imageador Operacional Terrestre
PAN	Banda pancromática
PCJ	Piracicaba, Capivari e Jundiaí
REM	Radiação Eletromagnética
RGB	Red, Green e Blue (Vermelho, verde e azul)
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SNIF	Sistema Nacional de Informações Florestais
SOS	Ordens sucessivas de dispersão
SR	Reflectância da superfície
SVM	Máquina de vetores de suporte
TIFF	Tagged Image File Format

TM	Mapeador Temático
TOA	Topo da Atmosfera
UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
UTM	Tranversa Universal de Mercator
WFI	Câmera imageadora de campo largo
WPM	Câmera multiespectral e pancromática de ampla varredura
XML	Extensible Markup Language

LISTA DE SÍMBOLOS

$E0$	Fator de irradiância
$QCALmáx$	ND máximo em relação a resolução radiométrica do sensor
Eb	Radiação direta recebida pelo objeto de interesse
Ed	Radiação dispersa durante a trajetória
$KTOA$	Coeficiente de conversão para radiância no topo da atmosfera
$L0$	Valor da radiância
$L0\lambda$	Radiância bidirecional aparente
$Lmáx\lambda$	Radiância espectral máxima
$Lmín\lambda$	Radiância espectral mínima
Ls	Radiação que atingiu a superfície
Td	Transmitância do sol a superfície
Tu	Transmitância da superfície ao sensor
θsz	Ângulo solar zenital
ρSR	Reflectância de superfície
ρa	Reflectância bidirecional aparente
$\rho path$	Reflectância do caminho até a superfície
a	Interferência de radiação de objetos vizinhos
c	Velocidade de propagação
con	Condicional
ESUN	Irradiânica solar no topo da atmosfera
F	Fator constante
m	Radiação dispersa pela armosfera
Offset(λ)	Valor em NDs para compensar a corrente escura do sensor
λ	Comprimento de onda
ν	Frequência
ρ(λ)	Variação da reflectância
$CC\lambda$	Coeficiente de calibração absoluta
d	Distância Terra-Sol

LISTA DE EQUAÇÕES

$L0\lambda = Lmín\lambda + (Lmáx\lambda\text{-}Lmín\lambda \cdot QCALmáx)$ ..... Equação de Calibração de Radiância

$L0\lambda = ND\lambda/CC\lambda$ ..... Coeficiente de Calibração CBERS-4A

$L0\lambda = ND\lambda\text{-}offset\lambda/CC\lambda$ ..... Equação de Radiância

$L\lambda = ND \times Calibração\ Absoluta$ .....

.....Equação de Conversão ND para Radiância Espectral

$\rho SR = \rho TOA\text{-}\rho path/\tau d \cdot \tau u$ ..... Equação de Conversão TOA para SR

$\rho TOA = \pi \cdot L0\lambda \cdot d^2/ESUN \cdot \cos(\theta sz)$ ..... Equação de Reflectância TOA

$\rho TOA = ND \cdot KTOA.$ .....Equação de Correção para Reflectância TOA

$\rho a = \pi \cdot L0\lambda \cdot d2/ESUN \cdot \cos(\theta sz)$ ..... Equação de Reflectância Bidirecional Aparente

Fator de Escala = (DN * 0.0000275) - 0.2 ..... Equação de Fator de Escala

$Con(\rho TOA\text{-}\rho path\tau d \cdot \tau u < 0{,}0, \rho TOA\text{-}\rho path\tau d \cdot \tau u)$.....

.....Condição de Contorno para Pixels Negativos

$Con(x) = \{1, se\ \forall i \in \{Blue, Green, Red, NIR\}, xi \in [xi, min, xi, max]\ 0, caso\ contrário$

.....Equação Condicional de Classificação Espectral

$F = \pi \cdot d^2/\cos(\theta sz)$ .....Equação Fator Constante Reflectância

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 Objetivos 17
1.2 Justificativas 17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 19
2.1 Sensoriamento Remoto 19
2.1.1 Resolução de imagens de satélites 21
2.1.1.1 Resolução espacial 22
2.1.1.2 Resolução espectral 23
2.1.1.3 Resolução radiométrica 24
2.1.1.4 Resolução temporal 25
2.2 Vegetação em Imagens Multiespectrais 25
3 MATERIAIS E MÉTODOS 29
3.1 Caracterização da Área de Estudo 29
3.1.1 Localização 29
3.1.2 Hidrologia 30
3.1.3 Clima 31
3.1.4 Geomorfologia 31
3.1.5 Geologia 32
3.1.6 Pedologia 32
3.1.7 Uso e Ocupação do Solo 32
3.2 Técnicas de Sensoriamento Remoto e Seleção do Sensor 33
3.2.1 Conversão de Números Digitais (ND) para Valores Físicos 34
3.3 Correção Atmosférica 38
3.4 Modelo de Transferência Radiativa: 6S 39
3.5 Py6S – Interface Python para o Modelo 6S 41
3.5.1 Definição de Parâmetros 42
3.5.2 Acesso e Interpretação dos Resultados Gerados pelo Modelo 6S 43
4 RESULTADOS 44
4.1 Correção Atmosférica das Imagens Multiespectrais CBERS-4A WPM 44
4.2 Delimitação da Assinatura Espectral da leucena no CBERS-4A 51
4.2.1 Amostragem da Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit 51
5 DISCUSSÃO 62

6 CONCLUSÃO **66**
REFERÊNCIAS **69**
APÊNDICES **73**
Apêndice 1: Cenas CBERS-4A WPM L4 **74**
Apêndice 2: Instalação do modelo Py6S e recomendações para uso **77**
Apêndice 3: Programação Py6S **81**

1 INTRODUÇÃO

O Brasil abriga 38.615 espécies de plantas vasculares, das quais 52% são endêmicas do país, parte dessa riqueza biológica está sendo ameaçada por invasões biológicas e, recentemente, uma das espécies exóticas invasoras que vem ganhando atenção crescente é a *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.

O Brasil abriga uma das floras mais ricas e complexas do planeta. Forzza et al. (2010) documentaram a presença de 32.364 espécies de plantas vasculares, das quais 56% são endêmicas, uma porcentagem que coloca o Brasil entre os principais países do mundo em termos de endemismo vegetal. Atualmente, um total de 38.615espécies de plantas vasculares estão catalogadas no Brasil, sendo 52% ou 20.185 endêmicas (Programa REFLORA, 2020).

Parte desse patrimônio, no entanto, está ameaçado pelas invasões biológicas, uma das mais graves ameaças à conservação de espécies nativas, comunidades e ecossistemas (Vitousek et al., 1996). A maioria dessas espécies invasoras foi transportada para outros continentes devido ao interesse e às atividades antrópicas, permitindo sua proliferação (Vitousek et al., 1996; Zenni e Ziller, 2011). Atualmente, são registradas 218 espécies de plantas exóticas invasoras que habitam ecossistemas brasileiros, dentre elas a leucena (Instituto Hórus, 2024).

Espécies exóticas são quaisquer espécies de plantas, animais ou microrganismos que vivem em um lugar onde não ocorrem naturalmente, ou seja, fora da sua área de distribuição original. Isso inclui também partes dessas espécies, como sementes, ovos ou qualquer forma que possa sobreviver e se reproduzir no novo ambiente (Ibama, 2022). Por sua vez, uma espécie exótica invasora é aquela cuja sua introdução e/ou dispersão ameaçam a diversidade biológica (Vitousek *et al.* 1996; Ibama, 2022), senão se trata de uma espécie exótica naturalizada, ou seja, que consegue se reproduzir de forma consistente, sem intervenção humana, mas que não se dispersam para longe (MORO *et al.*, 2012).

Charles Darwin, em sua obra “A Origem das Espécies”, já discutia a ideia de espécies invasoras e a potencial ameaça que poderiam apresentar a um ecossistema nativo. Ele introduziu a ideia de uma "economia da natureza", onde, em ambientes isolados por barreiras geográficas, espécies locais se adaptam tão bem ao ambiente que pequenas modificações poderiam gerar a predominância de algumas espécies. Com a introdução de novos organismos, se eles forem capazes de se adaptar ao novo habitat, podem desestabilizar esse equilíbrio natural e causar impactos ecológicos significativos (Darwin, 1859).

Há uma percepção de que as invasões biológicas representam o processo de seleção natural em ação, sendo uma tendência natural da evolução das espécies. De fato, invasões, assim como extinções, sempre fizeram parte da história evolutiva. No entanto, a diferença atual — similar às discussões sobre mudanças climáticas — está no ritmo acelerado com que essas invasões estão ocorrendo (Vitousek et al. 1996). O zoólogo Charles Elton (1958, p. 31), em seu trabalho pioneiro *The Ecology of Invasions by Animals and Plants* (A Ecologia das Invasões por Animais e Plantas), afirma: "(...) não devemos nos enganar: estamos testemunhando uma das grandes convulsões históricas na fauna e flora do mundo."

Um exemplo dessa dinâmica, é a introdução da gramínea *Eragrostis plana* (popularmente conhecida como capim-annoni), como contaminante de sementes de *Chloris gayana* Kunth (substrato para alimentação animal), enviadas para o estado do Rio Grande do Sul, Brasil, na década de 1950. Após a introdução, a *E. plana* superou espécies nativas de *Aristida sp.* em pastagens, considerada como uma grave erva daninha na época. Por causa disso, a *E. plana*, foi considerada uma alternativa viável para forragem e seu plantio foi incentivado no Sul brasileiro. Somente mais tarde, que os pecuaristas perceberam que a espécie era muito fibrosa em sua fase madura. O gado não comeria ou não engordaria quando se alimentasse dela (Zenni e Ziller, 2011). Atualmente, a espécie se encontra instalada em mais de dois milhões de hectares, nas estepes do Rio Grande do Sul, sem qualquer ganho econômico catalogado (Zenni e Ziller, 2011).

Outro exemplo é o domínio da *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. (leucena) originária da América Central, chegou ao Brasil na década de 1940, com o objetivo de produção de madeira, forragem e recuperação de áreas degradadas (Marteli, 2020). A espécie pode se apresentar tanto na forma arbustiva quanto arbórea, com alturas variando de 5 a 18 metros. Trata-se de uma planta perene, com crescimento rápido, adaptada a regiões tropicais áridas e que requer temperaturas entre 25°C e 30°C para um desenvolvimento ideal (Marteli, 2020).

Essa leguminosa floresce durante o ano todo, com maior intensidade nos meses de maior índice pluviométrico (Marteli, 2020). Além disso, a leucena possui características que favorecem o processo de invasão, como rápido crescimento, curto período pré-produtivo (Costa e Durigan, 2010) e alta produção de sementes ao longo do ano (Alves *et al*., 2014). A espécie é capaz de impactar ecossistemas nativos de forma rápida e gradual, estabelecendo-se com facilidade nas margens de vias (Zenni e Ziller, 2011). Também pode reduzir o potencial germinativo de espécies nativas, causar intoxicação animal, diminuir a qualidade de pastagens e atuar como hospedeira de pragas e doenças (Alves *et al*., 2014).

Recentemente, projetos municipais para o controle da leucena, começaram a ser motivados pelo Consórcio Intermunicipal das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), responsável pela gestão da UGRHI 5, constituída pelas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba (parte paulista), Capivari e Jundiaí (São Paulo, 2007; São Paulo, 2016).

Uma forma viável e com potencial para a identificação e discriminação de alvos na superfície terrestre, como espécies vegetais, é a aplicação de técnicas de Sensoriamento Remoto (Cassol, 2013). Em níveis terrestre e orbital, essa tecnologia é amplamente utilizada, por meio de sensores espectrais embarcados (Campbell e Wynne, 2011; Jensen, 2011). Achar PDF na biblioteca ou internet). De forma resumida, estes instrumentos captam a intensidade relativa da energia refletida por um alvo terrestre. A variação dessa radiação é conhecida como assinatura espectral do objeto, que varia de acordo com fatores químicos (como pigmentos fotossintetizantes e água) e estruturais (como a organização dos tecidos e folhas) do alvo.

Dessa forma, o presente trabalho propõe um estudo sobre a utilização de técnicas de Sensoriamento Remoto para a identificação da espécie exótica invasora leucena.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é aplicar técnicas de Sensoriamento Remoto e de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para o mapeamento da invasão da espécie leucena na bacia do Ribeirão Claro, integrante da Bacia Hidrográfica do Rio Corumbataí.

Como objetivos específicos, busca-se:

- Avaliar o processo de conversão em números digitais para reflectância de superfície no satélite CBERS-4A;
- Programar *script* para simulação de correção atmosférica de números digitais de imagens do CBERS-4A;
- Caracterizar a assinatura espectral da leucena em imagens CBERS-4A.

1.2 Justificativas

Além do valor taxonômico e científico, a biodiversidade representa uma história evolutiva complexa, alicerçada em um processo de diversificação que se deu por meio da fragmentação de padrões cosmopolitas, da evolução de grupos regionais e da parcial

randomização desses grupos pelo mundo (Elton, 1958). Esse processo foi impulsionado tanto pela capacidade de adaptação das espécies quanto pelas características da paisagem.

Parte desse patrimônio, no entanto, está ameaçado pelas invasões biológicas, uma das mais graves ameaças à conservação de espécies nativas, comunidades e ecossistemas (Vitousek et al., 1996). A maioria dessas espécies invasoras foi transportada para outros continentes devido ao interesse e às atividades antrópicas, permitindo sua proliferação (Vitousek et al., 1996; Zenni e Ziller, 2011). Atualmente, são registradas 218 espécies de plantas exóticas invasoras que habitam ecossistemas brasileiros, dentre elas a leucena (Instituto Hórus, 2024).

Estudos indicam que a leucena está presente em pelo menos 12 biomas brasileiros distintos, sendo que um dos mais afetados é a Mata Atlântica. Relatos também apontam seu domínio na Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba, onde planos estão sendo elaborados para o controle da espécie. Apesar de estudos indicarem, em contexto nacional, ocorrências da leucena, há uma escassez de publicações que forneçam uma estimativa clara da área ocupada por esta espécie no interior paulista. Portanto, para criar mais insumos sobre o tema e fomentar iniciativas de controle, este projeto propõe a análise de um fragmento da Sub-Bacia Hidrográfica do Corumbataí – a Sub-bacia do Ribeirão Claro a fim de avaliar o potencial do uso de ferramentas de Sensoriamento Remoto para caracterização, mapeamento e quantificação da leucena em municípios selecionados da bacia.

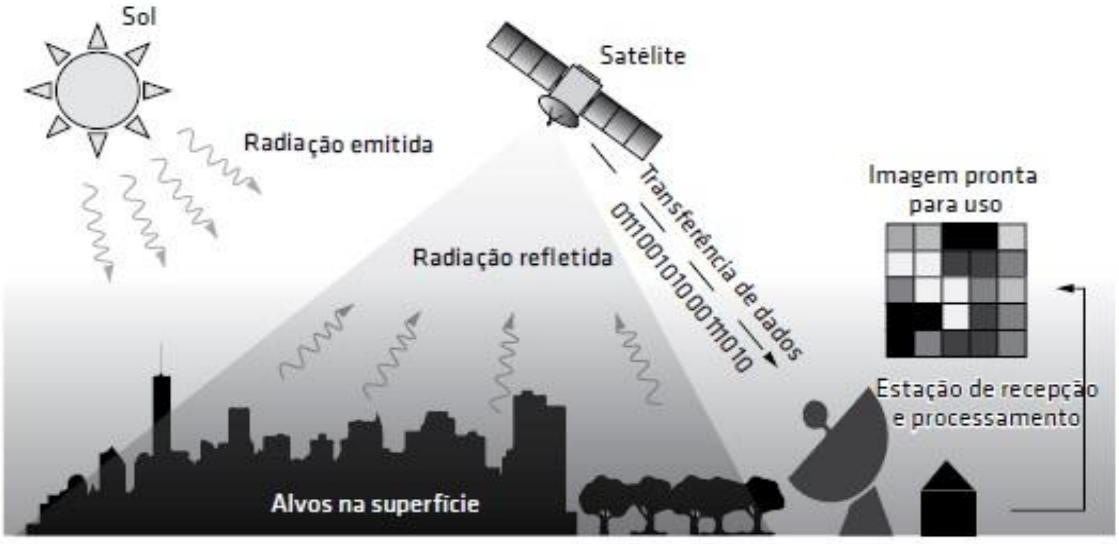
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sensoriamento Remoto

O Sensoriamento Remoto pode ser compreendido, em sua forma mais abrangente como a técnica de aquisição e dados sobre um objeto sem tocá-lo (Jensen, 2011). Em um escopo mais específico, Sensoriamento Remoto é uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre e corpos d'água superficiais, sem contato, por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética (REM) com materiais terrestres (Figura 1). Essas informações são capturadas instrumentos tais como câmeras, escâneres, lasers e outros dispositivos, montados em aeronaves ou satélites, e a análise da informação adquirida por meio visual ou processamento digital de imagens (Campbell e Wynne, 2011; Meneses, 2012).

Segundo Jensen (2011), o Sensoriamento Remoto pode fornecer informações fundamentais que outras áreas do conhecimento podem usar ao conduzirem investigações científicas, como: localização, elevação, profundidade, concentração de biomassa, índice de área foliar, atividade fotossintetizante e até condições atmosféricas se considerado o nicho do Sensoriamento Remoto meteorológico (Campbell e Wynne, 2011).

Figura 1 - Obtenção de informações, transferência e elaboração de imagens por Sensoriamento Remoto



Fonte: Processamento de imagens de satélite, Oficina de Textos, 2020.

A REM é uma forma de energia que se propaga pelo espaço vazio, ao mesmo tempo que age como uma onda, que seu comprimento é resultante da interação da radiação

eletromagnética com objetos da superfície terrestre (Baptista, 2019). Se for medida a distância entre dois picos sucessivos destas ondas define-se o comprimento ou tamanho da onda, as quais suas unidades de medidas são em frequência (hertz - Hz) e comprimento de onda (λ).

Da mesma forma, se for medido o número de picos de ondas que passam por um ponto fixo de referência, considerando a velocidade de propagação da REM (aproximadamente 300.000 km/s), é possível definir a sua frequência (ν). Como a velocidade de propagação (c) é uma constante, comprimentos menores têm frequências maiores. Inversamente, as ondas de comprimentos maiores têm frequências menores, formando a lei do comportamento ondulatório. Esse conjunto dos diferentes comprimentos de ondas conhecidas pelo homem é denominado como espectro eletromagnético (Meneses, 2012).

O espectro eletromagnético foi arbitrariamente dividido pelo homem em intervalos de comprimentos de ondas e nomeados de acordo com a função do uso encontrada para as suas aplicações. A divisão que é a mais aceita no sensoriamento segue os intervalos apresentados na Tabela 1, porém as faixas espectrais em negrito são as mais aplicadas em Sensoriamento Remoto. A Tabela 2 é um detalhamento dos limites de comprimentos de onda do espectro do visível.

Tabela 1 - Divisão do espectro eletromagnético

INTERVALO ESPECTRAL	COMPRIMENTO DE ONDA
Raios cósmicos	0,01 A^o
Raios gama	0,01 – 0,1 A^o
Raios X	0,1 – 10 A^o
Ultravioleta	100 nm – 0,38 μm
Visível	**0,38 – 0,76 μm**
Infravermelho próximo	**0,76 – 1,2 μm**
Infravermelho de ondas curtas	**1,2 – 3,0 μm**
Infravermelho médio	**3,0 – 5,0 μm**
Infravermelho termal	**5,0 μm – 1 mm**
Micro-ondas	1 mm – 100 cm
Rádio	1 m – 10 km
Áudio	10 – 100 km
Corrente alternada	> 100 km

Obs: $A^o = 10^{-10}$ m; nm = 10^{-9} m; μm = 10^{-6} m.

Fonte: elaborado pelo autor. Editado a partir de MENESES, 2012.

Tabela 2 - Detalhamento dos comprimentos de ondas em relação as cores da região do visível

COMPRIMENTO DE ONDA (µm)	COR DA LUZ REFLETIDA
0,380 - 0,455	Violeta
0,455 - 0,482	Azul
0,482 - 0,487	Azul - esverdeado
0,487 - 0,493	Azul - verde
0,493 - 0,498	Verde - azulado
0,498 - 0,530	Verde
0,530 - 0,559	Verde - amarelado
0,559 - 0,571	Amarelo - verde
0,571 - 0,576	Amarelo - esverdeado
0,576 - 0,580	Amarelo
0,580 - 0,587	Laranja - amarelado
0,587 - 0,597	Laranja
0,597 - 0,617	Laranja - avermelhado
0,617 - 0,760	Vermelho

Fonte: elaborado pelo autor. Editado a partir de MENESES, 2012.

Os elementos presentes na superfície terrestre, como vegetação, água e solo, interagem, absorvem e transmitem de forma distinta a REM a partir das características físicas e químicas, que influenciam diretamente no comprimento de onda que irá retornar para os sensores e até mesmo a forma que a radiação vai se dispersar em um ângulo provável. As variações decorrentes da reflectância ($\rho(\lambda)$), porcentagem de radiação eletromagnética que retornou para os sensores em relação ao total irradiado pelo sol em um momento definido, destacam tais elementos das superfícies nas imagens geradas por sensores remotos (Jensen, 2011; Meneses, 2012).

Retomando aos comprimentos de onda contidas no espectro do visível, as variações de energia refletida resultam no efeito visual denominado cor, logo, determina-se que um objeto ou superfície é, visualmente, de determinada cor pois ela reflete luz no mesmo comprimento de onda de 0,38 a 0,76µm e absorve as demais ondas (Campbell e Wynne, 2011).

2.1.1 Resolução de imagens de satélites

Nas aplicações de Sensoriamento Remoto, duas questões centrais são sempre levantadas: primeiro, a determinação da resolução mais adequada para identificar os objetos de interesse; e, segundo a escolha da escala que melhor represente os fenômenos ou elementos geográficos de interesse. Essa dualidade de parâmetros se intensifica pela limitação operacional

dos sensores orbitais na transmissão de grandes volumes de dados para as estações terrestres. Geralmente, a "regra" é que cenas que cobrem extensas áreas, como as provenientes dos satélites Landsat e CBERS, costumam apresentar resoluções espaciais menores (10 – 20m e 2 – 8m, respectivamente), enquanto os sensores que capturam áreas reduzidas, como os das plataformas Ikonos e Orbview, oferecem resoluções mais elevadas (em torno de 1 metro).

Todavia, a qualidade/capacidade de um conjunto de sensores de um satélite não é medida apenas pela resolução espacial. De certo, a resolução da imagem é a qualidade mais atrativa, porém a detecção ou identificação adequada de um objeto em imagens de Sensoriamento Remoto dependem também de outros três fatores críticos: o comprimento de onda das bandas (resolução espectral), os valores numéricos da radiância (resolução radiométrica) e a data de aquisição da imagem (resolução temporal) (Meneses, 2012).

2.1.1.1 Resolução espacial

A resolução espacial determina o tamanho do menor objeto que pode ser identificado em uma imagem. Meneses (2012) afirma que, por definição, um objeto somente pode ser detectado, quando o seu tamanho é, no mínimo, igual ou maior do que o tamanho do elemento da resolução espacial, ou seja, da resolução máxima informada nos sensores do satélite. Na prática, para um elemento superficial ser identificado na imagem, a resolução espacial deveria ser pelo menos a metade do tamanho do objeto medido na sua menor dimensão e possuir um bom contraste de reflectância. Caso contrário, objetos vizinhos podem se fundir, vistos na dimensão do pixel, conforme a Figura 2.

Muito relacionado com a ideia de resolução, é citado o pixel que é a unidade de medida padrão para imagens digitais. A resolução espacial, consequentemente, indica o tamanho do pixel e a quantidade de pixels que contém uma imagem (resolução). Sendo assim, quanto maior a resolução dos sensores do satélite selecionado, menores serão os tamanhos dos pixels, maior será densidade de pixels e mais detalhada é a imagem.

Figura 2 - Identificação de elementos pelo valor da resolução espacial e contraste



Fonte: Meneses, 2012, p. 25.

Essencialmente, determinar qual deve ser a resolução espacial de um sensor está atrelado com as características da área de estudo e o nível detalhe necessário para o sensor decifrar o objeto superficial procurado. Em áreas altamente antropizadas, como centros urbanos, um sensor com cenas menores e alta resolução espacial terá melhor desempenho para distinguir os diversos elementos construídos. Enquanto, se o intuito do estudo é abordar grande extensões de áreas primariamente rurais ou naturais, com uma paisagem mais uniforme, o comprometimento de parte da resolução espacial por uma cena que representa uma área maior, pode ser válido.

2.1.1.2 Resolução espectral

No campo do Sensoriamento Remoto, a capacidade de obter imagens simultaneamente em múltiplas bandas espectrais é uma característica fundamental dos sensores imageadores. Existem três parâmetros os quais definem a capacidade da resolução espectral de um satélite: o número de bandas que o sensor possui; a largura das bandas espectrais; e a amostragem espectral, ou seja, as posições que as bandas estão situadas no espectro eletromagnético (Meneses, 2012; Baptista, 2019).

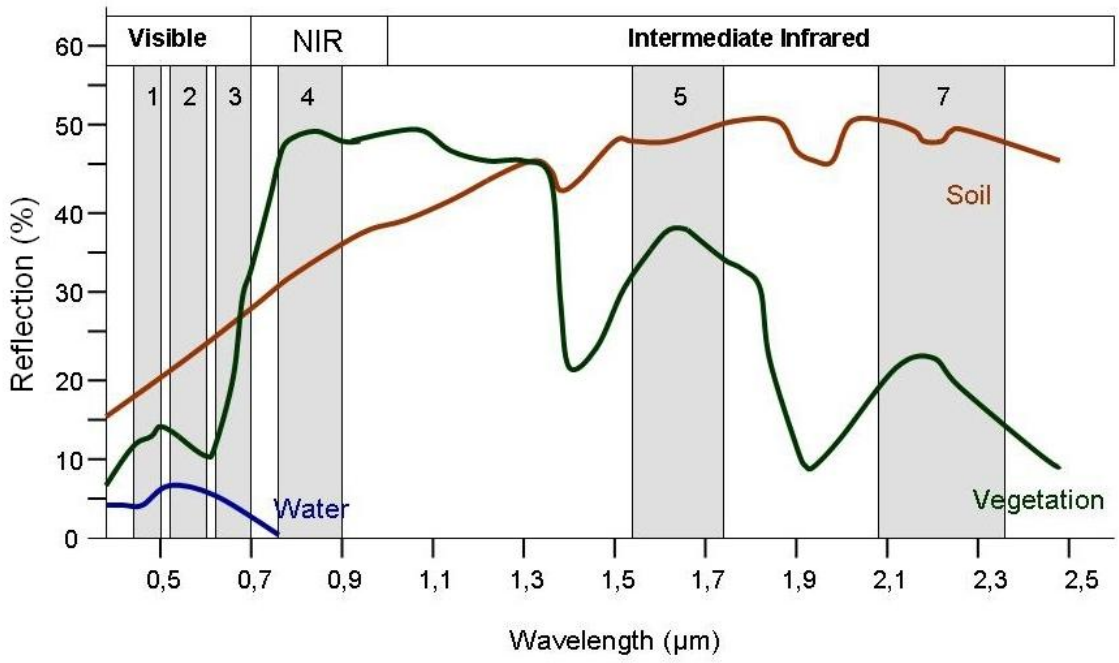
Por exemplo, um sensor tem melhor resolução se ele cobrir porções suficientes do espectro eletromagnético para ser capaz de distinguir diversos tipos de minerais. Não somente isso, o sensor também deve possuir uma largura de banda espectral estreita, em vista que, esse canal espectral individual, define o quão preciso será a determinação da feição de absorção exibidas pelos espectros de reflectância dos materiais.

Muito relacionado com essa ideia, a amostragem espectral é a coleta dados pelo sensor em pontos específicos de comprimento de onda, permitindo que seja possível "desenhar" uma curva que mostra como a luz ou radiação varia com o comprimento de onda. Esses pontos de coleta precisam estar próximos o bastante uns dos outros para identificar com precisão onde

a intensidade da radiação atinge um pico (máximo) ou um vale (mínimo), que são características importantes para entender a composição e as propriedades do objeto observado.

O conceito acima pode ser exemplificado pela Figura 3 para exemplificar padrões de assinatura espectrais de feições da superfície terrestre, que demonstram variação em suas respostas espectrais ao decorrer das bandas do satélite Landsat 7.

Figura 3 - Assinaturas espectrais da vegetação, solo e água sobrepostos às bandas do satélite Landsat 7



Fonte: European Space Agency, 2015.

2.1.1.3 Resolução radiométrica

A resolução radiométrica corresponde à intensidade de radiância, isto é, à quantidade de REM refletida pelo sistema atmosfera-superfície terrestre, iluminado pelo sol, que é captada pelo sensor e convertida em valores numéricos para cada pixel da imagem. Portanto, é a capacidade de um sensor em distinguir diferenças sutis na intensidade da REM detectada em uma cena. Quanto maior for a capacidade do detector medir as diferenças de intensidades dos níveis de radiância, maior será a resolução radiométrica.

De acordo com a variação de intensidade da radiação de entrada no sensor, é gerada uma resposta de saída em valores digitais que ele pode registrar. A quantização é normalmente expressa em valores binários, chamados de *bits*, e essa grandeza também é usada como referência para determinar a qualidade visual da imagem. Por exemplo, as imagens dos satéliites

geralmente são adquiridas em escalas de cinza, um sensor com resolução de 8 *bits* pode diferenciar 256 níveis de intensidade (2^8), portanto, 256 tons de cinza, enquanto um sensor de 12 *bits* é capaz de distinguir 4.096 níveis (2^{12}).

Para ilustrar essa diferença, Meneses (2012) propõe cenários onde a escolha da resolução radiométrica depende do escopo do trabalho. Se o objetivo for identificar uma floresta ou diferentes estágios de vegetação, não há necessidade de uma medida refinada de radiância, pois as árvores formarão um pixel, gerando uma textura visual característica suficiente para este propósito. Por outro lado, se a meta for identificar uma espécie de árvore individualmente, algo possível com uma resolução espacial de 1 metro, a resolução radiométrica deverá ser mais detalhada para distinguir variações espectrais sutis entre espécies dentro de uma floresta.

2.1.1.4 Resolução temporal

A resolução temporal está relacionada à frequência com que o sensor revisita uma área e captura imagens periódicas ao longo de sua vida útil. Isso é possível porque os satélites de Sensoriamento Remoto realizam uma órbita heliossíncrona, um tipo particular de órbita semipolar em que seu plano de órbita é fixo e ortogonal ao sentido de rotação da Terra. Dessa forma, o satélite passa sobre o mesmo ponto da superfície terrestre sempre no mesmo horário local e orbita com deslocamento aproximado de 97º a 98º

Segundo Meneses (2012), satélites de Sensoriamento Remoto realizam aproximadamente 14 órbitas por dia. No entanto, como cada sensor cobre apenas uma faixa da superfície terrestre, as 14 imagens capturadas ficam distantes entre si por milhares de quilômetros, devido às velocidades relativas da órbita do satélite e da rotação da Terra de oeste para leste. A cada novo dia, a posição da órbita avança na direção oeste até o satélite fazer o recobrimento total do globo. A única variação deste processo é a largura das faixas de imageamento entre sensores, que quanto mais largas, maior será a resolução temporal, dado que o satélite cumprirá o imageamento do planeta em menor tempo, afetando diretamente a disponibilidade de cenas.

2.2 Vegetação em Imagens Multiespectrais

No caso da vegetação, observa-se um comportamento espectral típico: na região do visível, o dossel vegetal exibe baixos níveis de reflectância devido à presença dos pigmentos fotossintetizantes, que absorvem a radiação eletromagnética para a realização da fotossíntese.

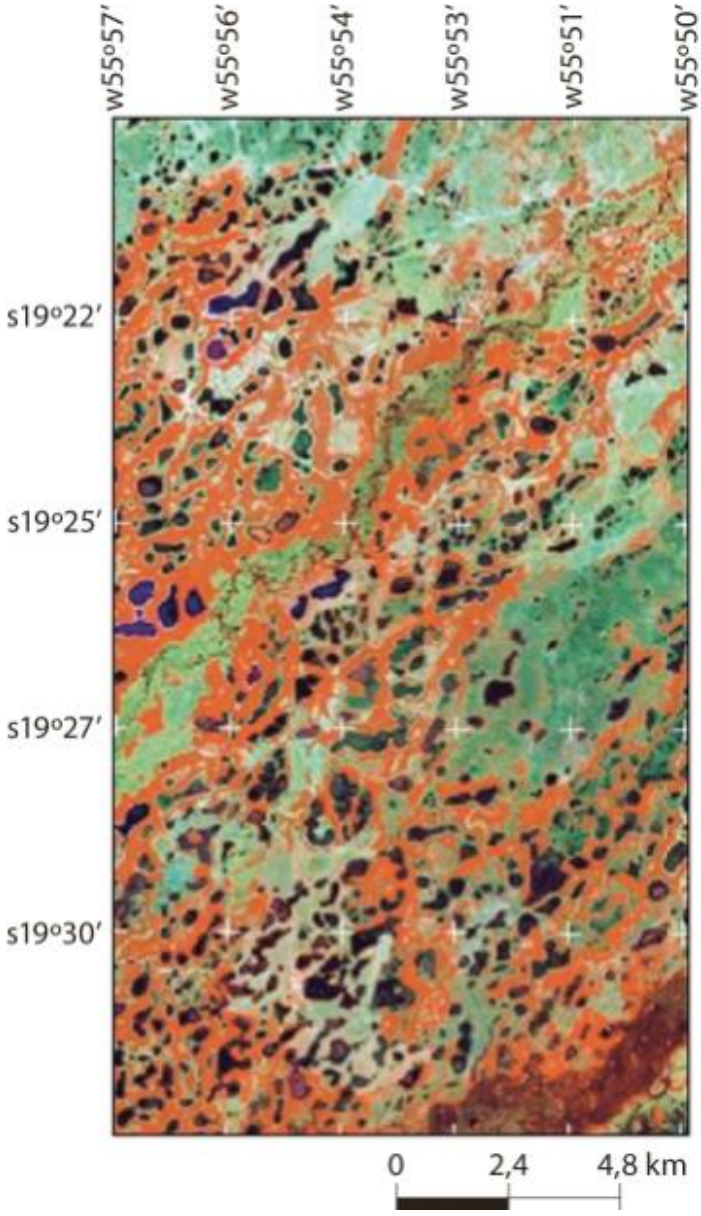
No infravermelho próximo, a reflectância aumenta significativamente, resultado do espalhamento da radiação pelas estruturas internas das folhas e da interação entre múltiplas camadas foliares. Já no infravermelho médio, ocorre nova queda nos valores de reflectância, principalmente devido ao conteúdo de água nas folhas (Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich, 2012).

Os níveis baixos de reflectância na região do visível, esperados para uma cobertura vegetal, não se devem exclusivamente à absorção dos pigmentos existentes nas folhas, mas também às sombras que se projetam entre as folhas, as quais são dependentes da geometria de iluminação, da DAF (Distribuição Angular das Folhas) e da rugosidade do dossel em sua camada superior (topo do dossel). De qualquer forma, espera-se que a vegetação se apresente mais escura em uma imagem referente à região do visível e mais clara em uma região referente à região do infravermelho próximo e, em seguida, novamente mais escura em uma imagem referente à região do infravermelho médio (Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich, 2012).

Os autores, oferecem um cenário de estudo muito semelhante ao objetivo deste trabalho: a elaboração de um mapa temático com destaque a cinco grupos de elementos superficiais, água, braquiária, cerradão, cerrado e campo. A expectativa dos autores é de que o cerradão , por possuir um porte florestal e dossel frequentemente dividido em dois ou três estratos verticais, apresente: tonalidade mais escura do que as demais vegetações na banda do visível, devido maior atividade fotossintética e/ou quantidade de folhas realizando fotossíntese; tonalidade clara na banda do infravermelho próximo, em razão do espalhamento múltiplo da radiação eletromagnética por parte das folhas; e tonalidade novamente escura no infravermelho médio, por causa da maior quantidade de folhas contendo água.

Através da interpretação visual foi destacado do mapa temático que o cerradão apresenta uma tonalidade avermelhada, mais intensa, e com textura mais rugosa do que aquela verificada nos dosséis de cerrado, que apresentam uma tonalidade ligeiramente mais clara em comparação. Já o campo natural apresenta cores esverdeadas e esbranquiçadas, uma vez que sua taxa fotossintética deverá ser inferior àquela apresentada pelas fisionomias florestais mencionadas e devido ao fato que o solo influencia na resposta espectral do dossel herbáceo, que implicará maiores níveis de brilho nas regiões do visível e do infravermelho médio. Os corpos d’água são apresentados com tonalidades escuras. As braquiárias seguem uma tendência semelhante ao campo, porém com destacada por manchas de tonalidade mais clara (Figura 4).

Figura 4 - Composição colorida Blue, Red e Green do Pantanal de Nhecolândia, MS.

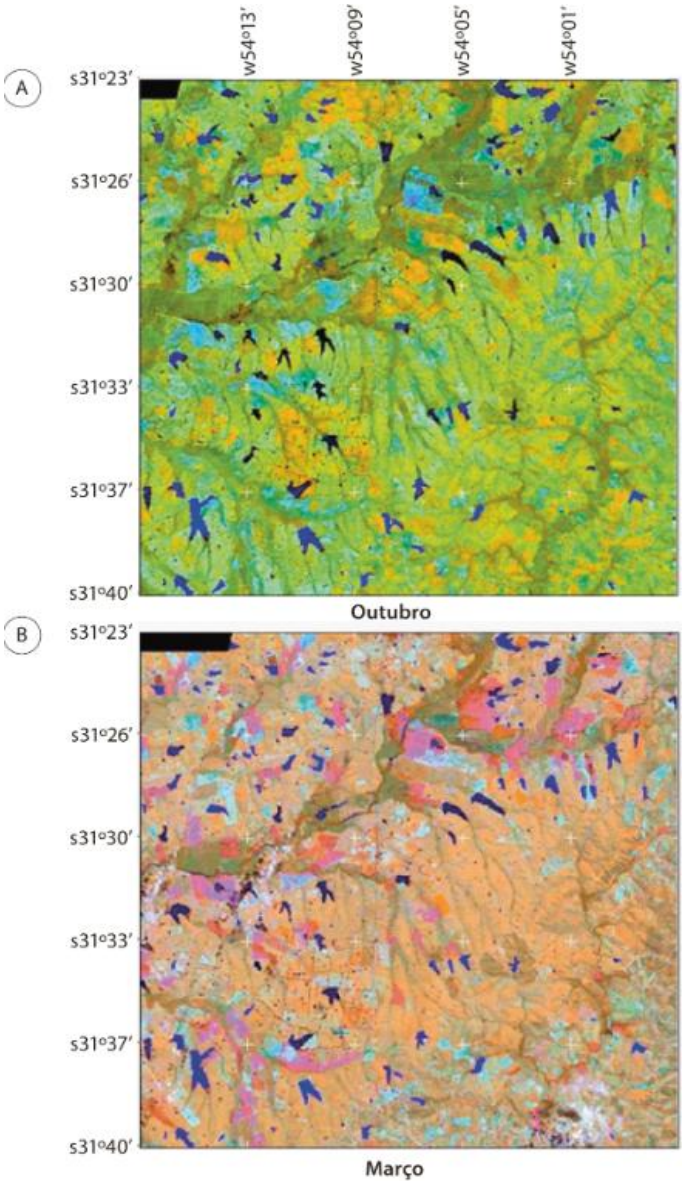


Fonte: PONZONI, Flávio Jorge; SHIMABUKURO, Yosio Edemir; KUPLICH, Tatiana Mora. Sensoriamento Remoto da vegetação.

Embora esse exemplo seja instrutivo, é fundamental reconhecer que cada cenário de interpretação varia de acordo com os objetivos específicos do estudo. No entanto, exemplos como o mencionado permitem estabelecer diretrizes gerais para a interpretação de diferentes tipos de vegetação, com base nas diferenças fisionômicas observadas. Ainda assim, diversos fatores podem alterar os padrões espectrais entre diferentes cenas. A variação sazonal é um exemplo claro: a assinatura espectral da vegetação pode diferir significativamente entre imagens adquiridas no verão (período chuvoso) e no inverno (estação seca) (Figura 5).

Observa-se que, embora representem a mesma superfície de terreno, as Figuras 5a e 5b exibem colorações distintas. A paisagem, composta majoritariamente por pastagens, apresenta variação tonal associada às condições sazonais. Em outubro, período de transição entre o inverno seco e o início da primavera, ocorre menor concentração biomassa no pasto que em tonalidades mais esverdeadas. Em contraste, em março, ao final do verão chuvoso, o aumento da umidade do solo e da biomassa promove maior vigor vegetativo, traduzido em tons mais avermelhados, indicando maior resposta espectral nas bandas do visível e do infravermelho médio.

Figura 5 - Composição colorida Blue, Red e Green de uma porção de vegetação do Rio Grande do Sul coletadas em datas diferentes: (A) outubro/2002 e (B) março/2003.



Fonte: PONZONI, Flávio Jorge; SHIMABUKURO, Yosio Edemir; KUPLICH, Tatiana Mora. Sensoriamento Remoto da vegetação.

Além disso, a mesma fisionomia vegetal pode apresentar variações florísticas, ou seja, composições distintas de espécies com diferentes estruturas, que influenciam a aparência do dossel. Outros fatores interferentes incluem a presença de nuvens e condições atmosféricas diversas, que também afetam a resposta espectral captada pelos sensores.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

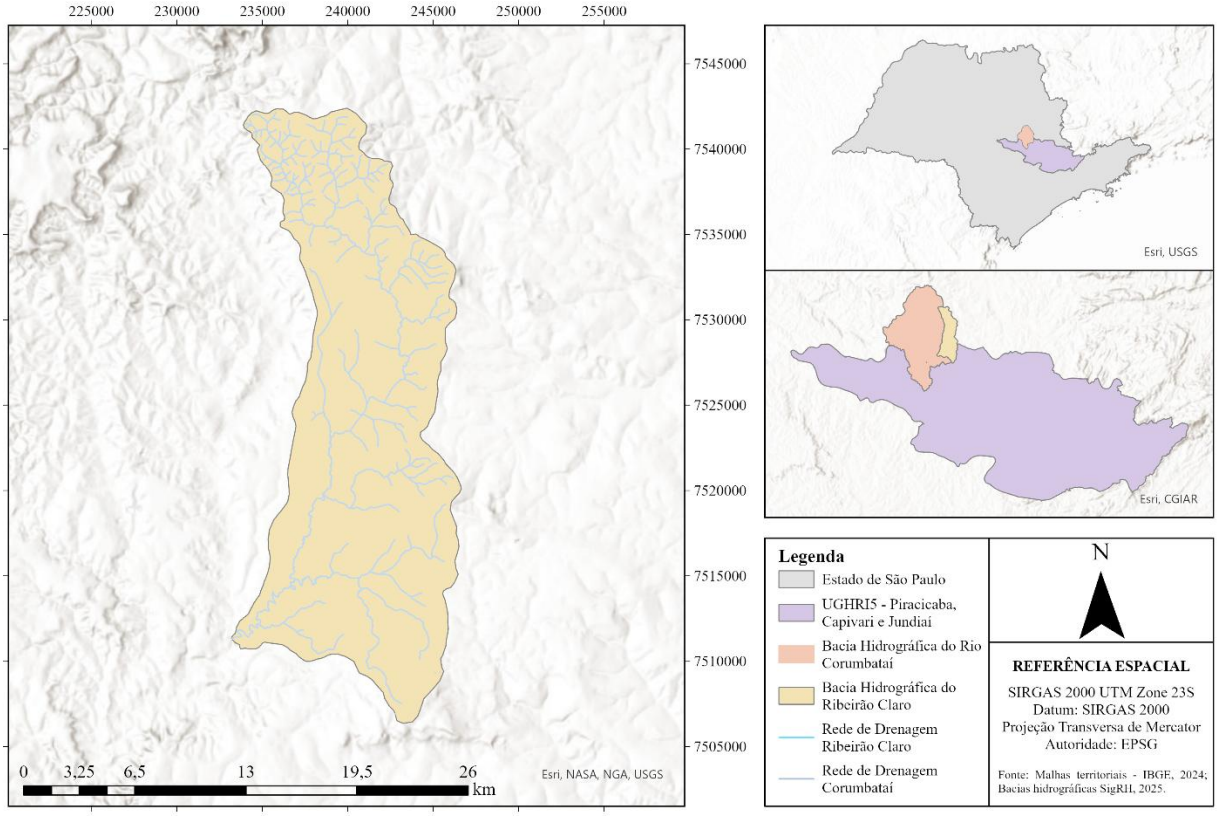
Inicialmente, foi realizada a caracterização da área de estudo, a bacia hidrográfica do Ribeirão Claro. Trata-se de uma região relativamente antropizada, em vista que maior parte de sua extensão (83,14%) é dedicada para uso rural, embora ainda haja fragmentos de floresta nativa e cerrado (8,54%). Apesar do processo de transformação antrópica, a paisagem segue om padrão comum de cidades interioranas com longos trechos contínuos de propriedades rurais intercalado com vegetação em diferentes estágios de desenvolvimento.

3.1 Caracterização da Área de Estudo

3.1.1 Localização

A bacia do Ribeirão Claro está localizada no estado de São Paulo, no município de Rio Claro, estendendo-se por uma área aproximada de 290,58 km² (Figura 6). A área da bacia é representada pelas folhas Araras (SF-23-M-II-3) (IBGE, 1969a), Corumbataí (SF-23-Y-A-I-2) (IBGE, 1971), Rio Claro (SF-23-M-I-4) (IBGE, 1969b), entre as coordenadas UTM (Transversa Universal de Mercator) 234.500 e 246.000 m E e 7.519.500 e 7.542.000 m N, em escala 1:50.000.

Figura 6 - Localização da microbacia do Ribeirão Claro, integrada na bacia Hidrográfica do Rio Corumbataí



Fonte: Malhas territoriais - IBGE, 2024; Bacias hidrográficas SigRH, 2025. Elaborado pelo autor, 2025.

3.1.2 Hidrologia

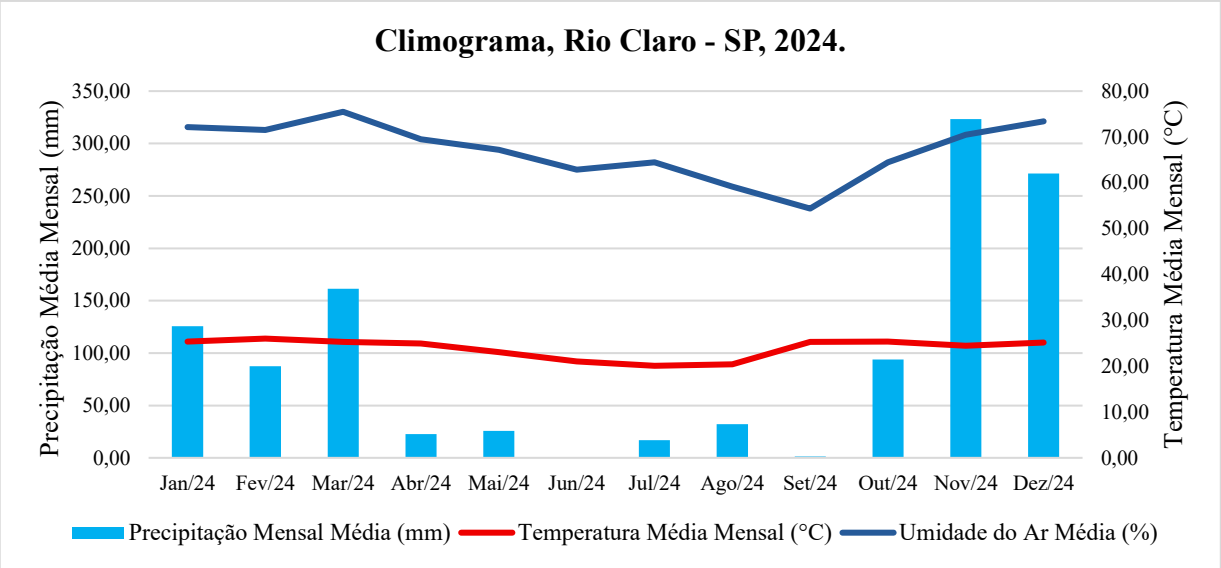
A bacia hidrográfica do Ribeirão Claro é uma das cinco sub-bacias que formam a bacia Hidrográfica do Rio Corumbataí, que por sua vez integra a bacia do Rio Piracicaba. Deste modo, assume-se que o Ribeirão Claro está situado na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 5 – PCJ, responsável por gerenciar as macros bacias do Rio Piracicaba, Capivari e Jundiaí.

O Ribeirão Claro nasce na zona rural do município de Corumbataí e possui uma extensão aproximada de 50,08 km, atravessa áreas agrícolas (principalmente cana-de-açúcar), pastagens e áreas florestais. Já no município de Rio Claro, atravessa a Floresta Estadual Edmundo Navarro Andrade (FEENA) e segue para a parte leste da zona urbana do município (Fonseca, 2008).

3.1.3 Clima

Segundo o sistema de Köppen, com base nas características de temperatura e precipitação, a área da bacia é classificada como de clima tropical do tipo Cwa, clima subtropical úmido, caracterizado por invernos secos e verões quentes chuvosos. O período chuvoso se estende dos meses de outubro a março (primavera e verão), enquanto o período seco ocorre de abril a setembro (outono e inverno), com uma transição gradual entre os dois e um pico de precipitação de 323,25 mm no mês de novembro (Gráfico 1) e a precipitação média anual é aproximadamente 1.161,47 mm (CEMADEN, 2025).

Gráfico 1 - Climograma, Rio Claro – SP, 2024.



Fonte: CEMADEN, 2025; CIIAGRO, 2025. Elaborado pelo autor, 2025.

As temperaturas médias anuais variam entre 20,1 ºC e 26,1 ºC, no município de Rio Claro, podendo variar de acordo com a região/distrito da cidade. Segundo a estação RIO CLARO (V0471) da CIIAGRO (Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas), a máxima catalogada foi de 34,6 ºC, em setembro (2024), com umidade média do ar de 54,38%, a menor do ano. Enquanto, a temperatura mínima ocorrida é de 10,9 ºC, em agosto (2024), com umidade média do ar de 59,18%.

3.1.4 Geomorfologia

Segundo Almeida (1964), a divisão do estado de São Paulo por regiões geomorfológicas segue quatro zonas distintas: a Província Costeira, que seria o litoral paulista, o Planalto Atlântico, região de grande diversidade topográfica após as serras litorâneas, a Depressão Periférica Paulista que são relevos planos ou ondulados que se destacam do Planalto Atlântico até os derrames basálticos que compõe as Cuestas Basálticas em sentido noroeste do estado. Por último, ocorre a região do Planalto Ocidental, que se estende até o Rio Paraná.

Portanto, a bacia hidrográfica do Ribeirão Claro está contida dentro da depressão periférica paulista, ou seja, é um local com topografia pouco acidentada com desníveis da ordem 20 a 50 metros e excepcionalmente superiores a 100 metros. Trata-se de paisagens com aspecto de monotonia, característica pela amplitude de horizontes e suavidades de formas, como colinas de topo aplainados, levemente convexas e divisores de vales largos que variam entre 550 e 650 metros (Penteado, 1976). A Autora destaca que a superfície geral dos interflúvios dos rios Corumbataí-Cabeça, Cabeça-Passa Cinco, Corumbataí-Ribeirão Claro e demais, têm como nível dominante o intervalo de 600-630 metros.

3.1.5 Geologia

A bacia do Ribeirão Claro, encontra-se na porção leste da Bacia Sedimentar do Paraná, e é constituída predominantemente pelas formações Corumbataí, Piramboia e Rio Claro, além de intrusões de diabásio relacionadas à Formação Serra Geral (Sisto, et. al, 2018).

3.1.6 Pedologia

Segundo o trabalho de Rossi (2017), na área da bacia hidrográfica do Ribeirão Claro, observa-se a predominância de quatro ordens de solo na nomenclatura Embrapa (2021): Latossolos Vermelhos, Latossolos vermelho-Amarelos, Argissolos Vermelho-Amarelos e Neossolos Litólicos.

3.1.7 Uso e Ocupação do Solo

Valente (2001), em seu diagnóstico ambiental da região de Rio Claro mapeou a seguinte distribuição de classes de uso do solo (Tabela 3):

Tabela 3 - Uso e ocupação do solo dentro da sub-bacia do Ribeirão Claro

Uso e Cobertura do Solo	Área		
	(ha)	(km²)	(%)
Cana-de-açúcar	11.416,89	114,17	39,29
Pastagem	7.302,28	73,02	25,13
Floresta plantada	29.05,80	29,06	10,00
Floresta nativa	2.406,00	24,06	8,28
Cerrado	75,55	0,76	0,26
Fruticultura	1.696,99	16,97	5,84
Cultura anual	836,87	8,37	2,88
Mineração	0,00	0,00	0,00
Área urbana	1.319,23	13,19	4,54
Outros	1.098,39	10,98	3,78
Total	**29.058,00**	**290,58**	**100,00**

Fonte: Diagnóstico Ambiental, Prefeitura de Rio Claro, Volume III, 2014.

A área ocupada com floresta nativa nessa sub-bacia (8,28%) representa 24,06 km² de fragmentos pertencentes ao bioma de Mata Atlântica (EcosBio, 2014). Enquanto a vegetação de Cerrado apresenta-se extremamente reduzida (0,76 km²), correspondendo a apenas 0,26% da área total da bacia (Valente, 2001).

Esses remanescentes são caracterizados, principalmente pela tipologia florestal de floresta estacional semidecidual, ou seja, uma vegetação caducifólia (folhas que caem) devido a sazonalidade climática definida por dois períodos distintos de intensas chuvas e outra de período seco. Ademais, de forma menos definida, ocorrem formações de Savana e capoeiras, relativas ao Cerrado, que são compostas por uma vegetação menos densa, com árvores baixas, troncos e ramos tortuosos, e arbustos espaçados, associados a gramíneas (SNIF, Sistema Nacional de Informações Florestais, 2020).

3.2 Técnicas de Sensoriamento Remoto e Seleção do Sensor

Foram consideradas três alternativas metodológicas: (i) utilização de dois satélites distintos, um com maior resolução espectral, maior largura de imageamento e menor resolução espacial para cobertura regional e outro com alta resolução espacial para o imageamento individualizado da leucena; (ii) utilização de um satélite de resolução espacial e espectral intermediárias e com boa disponibilidade de imagens, capaz de atender tanto à análise regional

quanto ao mapeamento mais detalhado; (iii) realizar aerolevantamento com drone, para captar mosaicos altamente detalhados de dossel. As leucenas seriam identificadas manualmente nessas imagens e utilizadas como amostras para treinar um modelo de detecção em escala regional.

Entre as opções analisadas, optou-se por utilizar um único satélite, sendo selecionado o CBERS-4A, pertencente à sexta geração do programa CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite*) e utilizada a coletânea de bandas com ID: CBERS4A_WPM20414120231216 (registradas em 16 de dezembro de 2023), coleção do sensor WPM, nível L4, portanto, imagens com correção radiométrica e correção geométrica de sistema. As cenas adquiridas estão presentes no anexo I.

O CBERS-4A, lançado em 2019, conta com sensores ópticos de média e alta resolução, como o WPM (câmera multiespectral e pancromática de ampla varredura), MUX (câmera multiespectral) e o WFI (câmera imageadora de campo largo). Esses instrumentos permitem a obtenção de imagens com resolução espacial e frequência de revisita compatível com aplicações em monitoramento ambiental, uso e ocupação do solo, e mudanças na cobertura vegetal (Tabela 5).

Tabela 4 - Características das câmeras do CBERS-4A

Características	**WPM**	**MUX**	**WFI**
Bandas Espectrais	0,45 - 0,52 µm (B)	0,45 - 0,52 µm (B)	0,45 - 0,52 µm (B)
	0,52 - 0,59 µm (G)	0,52 - 0,59 µm (G)	0,52 - 0,59 µm (G)
	0,63 - 0,69 µm (R)	0,63 - 0,69 µm (R)	0,63 - 0,69 µm (R)
	0,77 - 0,89 µm (NIR)	0,77 - 0,89 µm (NIR)	0,77 - 0,89 µm (NIR)
	0,45 - 0,90 µm (PAN)		
Resolução	2 m	16,5 m	55 m
	8 m		
Largura da Faixa Imageada	92 km	95 km	684 km
Visada Lateral de Espelho	não	não	não
Revisita	31 dias	31 dias	5 dias
Quantização	10 bits	8 bits	10 bits
Taxa de Dados Bruta	1800.8 Mbps	65 Mbps	50 Mbps

Fonte: elaborado pelo autor, 2025. Editado a partir de Câmeras Imageadoras, Inpe, 2024.

3.2.1 Conversão de Números Digitais (ND) para Valores Físicos

A ideia de números digitais (ND) está atrelada ao conceito de resolução radiométrica, apresentado anteriormente. ND corresponde ao termo utilizado para se referir ao "valor de brilho" ou "valor do pixel", que expressa a intensidade registrada pelo sensor. Entretanto, o valor fornecido em ND não considera elementos atmosféricos que interferem acentuadamente na intensidade da REM incidente e acabam por ofuscar a resposta de alvos superficiais de interesse (Meneses, 2012; Lillesand, Kiefer e Chipman, 2015).

Para superar essa limitação, torna-se necessária a conversão desses valores em parâmetros físicos. Isso requer o conhecimento de algumas características do sensor responsável pela geração das imagens, bem como das condições ambientais que influenciam as observações realizadas em nível orbital.

Atualmente, o INPE disponibiliza dados de reflectância de superfície para as câmeras WFI a bordo dos satélites CBERS-4, CBERS-4A e Amazonia-1, além da câmera MUX do CBERS-4. No entanto, desde julho de 2024 não há previsão de liberação de dados de reflectância para o sensor WPM do satélite CBERS-4A (INPE, 2024b).

O que é medido pelo sensor orbital e dá origem ao ND é o valor de radiância (L_0) que está diretamente relacionado com o fator de irradiância (E_0), ou seja, a radiação eletromagnética proveniente do sol que incide sobre a superfície. O objeto terrestre recebe uma porção direta dessa radiação (E_b) enquanto outra parte da radiação (E_d) se espalha durante a trajetória. O sensor, por sua vez, recebe um fluxo de radiação do objeto específico (radiação que de fato atingiu a superfície) (L_s) e outra intensidade do remanescente difuso da trajetória (L_p). Por fim, (m) representa a porção da radiação que é espalhada pela atmosfera, e (a) se trata da contribuição de objetos vizinhos àquele de interesse (Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich, 2012).

A mesma radiância pode ser expressa também através da seguinte equação:

$$L_0(\lambda) = ND(\lambda) - \frac{offset(\lambda)}{CC(\lambda)} \quad \text{(I)}$$

Offset(λ) refere-se a uma quantidade em valores de NDs suficiente para compensar a chamada corrente escura do detector, ou seja, para compensar a reposta do detector mesmo quando ele não recebe qualquer quantidade de retorno de radiação incidente. $CC(\lambda)$, coeficiente de calibração, refere-se a um valor de ganho ajustado para impedir que o valor medido de objetos terrestres sature positivamente quando são muito claros, e negativamente quando

observa objetos escuros. Esses valores são específicos para cada banda do sensor e podem ser obtidos nos metadados da cena adquirida (Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich, 2012).

Destaca-se que o valor de $L_0(\lambda)$ é medido em nível orbital e, por não se referir exclusivamente ao brilho do objeto observado, recebe a denominação de *radiância aparente*.

Uma vez convertidos para radiância aparente, assume-se que os dados contidos nas imagens de diferentes bandas de um mesmo sensor ou de sensores diferentes podem ser comparados entre si. Contudo, como a radiância é um parâmetro radiométrico dependente da intensidade de radiação emitida pela fonte, ela passa a não ser o parâmetro mais apropriado para avaliações das propriedades espectrais de objetos. Nesse caso, a reflectância passa a assumir o papel de destaque nesses tipos de estudo, lembrando que essa propriedade espectral de um objeto é expressa pelos fatores de reflectância (Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich, 2012

Para a transformação de ND em Fator de Reflectância Bidirecional (FRB)aparente, isto é, a reflectância calculada a partir do Topo da Atmosfera (TOA), realiza-se a conversão dos NDs em valores de radiância bidirecional aparente como base nos parâmetros de calibração fornecidos pelo fabricante, obtido em missões de calibração antes do lançamento, segundo a equação:

$$L_0(\lambda) = L_{mín}(\lambda) + (L_{máx}(\lambda) - L_{mín}(\lambda) \cdot QCAL_{máx}) \qquad \text{(II)}$$

Onde, $L_0(\lambda)$ é a radiância bidirecional aparente resultante da $L_{mín}(\lambda)$ e $L_{máx}(\lambda)$, radiância espectral mínima e máxima, e $QCAL_{máx}$ que referência o número digital máximo, em relação a resolução radiométrica do sensor, a ser convertido ((Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich, 2012).

No caso do satélite CBERS-4A, Ponzoni, Junior e Lamparelli (2005), determinam que os coeficientes de calibração por banda espectral segundo a equação:

$$L_0(\lambda) = \frac{ND(\lambda)}{CC(\lambda)} \qquad \text{(III)}$$

Onde: CC_λ é o coeficiente de calibração para a banda λ (λ =1, 2, 3, 4 e PAN), é referente ao número digital médio em torno do pixel central na banda, e, por fim, a conhecida radiância bidirecional aparente ($L_0(\lambda)$). Os coeficientes de calibração absoluta estão presentes no arquivo .XML que acompanha cada banda da imagem. O resultado da radiância espectral aparente será dado em $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$.

Com isso, para a transformação dos valores de $L_0(\lambda)$ em valores de reflectância bidirecional aparente (ρ_a), utiliza-se a seguinte equação:

$$\rho_a = \frac{\pi \cdot L_0(\lambda) \cdot d^2}{ESUN \cdot cos\,(\theta_{sz})} \qquad \text{(IV)}$$

Adequando a equação as informações pertencentes a cenas coletadas se têm que: dd trata-se da distância Terra-Sol em unidades astronômicas, que varia de acordo com a data do ano (assume o valor 0,9841643 para a cena coletada em 16 de dezembro, 2023) (INPE, 2023) e $\theta_{sz}\theta_{sz}$ que seria o ângulo solar zenital, presente nos metadados da imagem, semelhante ao coeficiente de calibração absoluta (CC_λ). *ESUN* representa os valores de irradiância solar no topo da atmosfera na banda (1, 2, 3, 4 e pan) que, segundo Veras (2022), para o CBERS-4A pode ser utilizado para as bandas os mesmos valores *ESUN* do satélite CBERS-4, conforme tabela 5:

Tabela 5 - Parâmetros de calibração e transformação para o sensor WPM/CBERS-4A

Sensor/Satélite	Bandas espectrais	Onda Central	CCλ	ESUN
	(μm)	(μm)	(Radiância/DN)	W/m²·μm
WPM/ CBERS-4A	Blue (0,45 - 0,52)	0,485	0,291070	1958,00
	Green (0,52 - 0,59)	0,555	0,297832	1852,00
	Red (0,63 - 0,69)	0,660	0,232504	1559,00
	NIR (0,77 - 0,89)	0,830	0,178993	1091,00
	PAN (0,45 - 0,90)	0,675	0,184471	1210,49

Fonte: Veras, 2022, p. 41.

Destaca-se que, após esta transformação cujos NDs foram convertidos para FRB aparente, é viável fazer operações aritméticas utilizando dados de diferentes bandas espectrais de um mesmo ou sensor ou entre sensores diferentes, dado que os novos valores refletem parâmetros físicos apresentados em uma mesma escala. Porém, contém toda a interferência atmosférica, ainda não sendo a informação ideal para caracterizar espectralmente um objeto de interesse.

3.3 Correção Atmosférica

De acordo com Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich (2012), frequentemente, a correção atmosférica sobre valores de FRB aparente é realizada por meio de dois métodos. Um deles é conhecido como *Dark Object Subtraction* (DOS), proposto por Chavez (1988), que consiste na subtração de um valor ND constante de toda a imagem digital, aplicando, assim, um valor de bruma constante sobre a cena.

A lógica por trás desse método é que, em qualquer cena e em qualquer uma de suas bandas, existe uma grande probabilidade de que alguns pixels representem objetos completamente pretos, ou seja, com 0% de reflectância, seja em valores de ND, seja naqueles já convertidos para FRB aparente (Chavez, 1988).

Idealmente, os sensores orbitais não deveriam captar quaisquer valores de radiância em locais de sombra (como sombras provocadas pela topografia ou por nuvens, por exemplo) ou de objetos terrestres capazes de absorver totalmente a radiação, como corpos d'água. No entanto, devido aos efeitos de espalhamento da radiação durante sua trajetória pela atmosfera, essas áreas sombrias não se apresentam completamente escuras.

Dessa forma, os pixels que apresentam valores de ND ou FRB aparente superiores a zero têm esse excesso explicado pela interferência aditiva do espalhamento atmosférico. Por

esse motivo, faz-se necessária a correção atmosférica, subtraindo-se esse valor excedente da banda espectral específica.

O outro método para a correção de efeitos atmosféricos sobre dados orbitais pode ser aplicado somente em valores de radiância aparente ou FRB aparente. Trata-se dos Modelos de Transferência Radiativa (MTR), esses modelos são implementados em programas computacionais que oferecem profundidade para a entrada de informações específicas originadas da caracterização atmosférica e, principalmente aerossóis, para a região de interesse e datas específicas da coleta (Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich, 2012).

Os Autores destacam que a principal vantagem dessa abordagem reside em sua fundamentação física, já que leva em conta o fenômeno de absorção da radiação eletromagnética e considera as condições atmosféricas reais no momento da aquisição da imagem. Essa é, ao menos, a finalidade ideal de sua aplicação. Contudo, para que se alcance um resultado plenamente fidedigno, a coleta e processamento dessas informações pode demandar equipes multidisciplinares, instrumentação específica de custo elevado.

Esse nível de complexidade, entretanto, não se alinha completamente ao escopo deste trabalho, que visa caracterizar a assinatura espectral da leucena por meio de técnicas de Sensoriamento Remoto. Assim, com base na literatura especializada, compreende-se que é viável empregar tais modelos com condições de contorno bem definidas e aproximações adequadas, as quais têm se mostrado eficazes em estudos multiespectrais similares (Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich, 2012). Consoante a este propósito, foi selecionado o *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum* (6S) como o modelo de transferência radiativa, tendo em vista que é um dos mais amplamente utilizados e fortemente documentado na comunidade de Sensoriamento Remoto (Vermote et al., 2006).

3.4 Modelo de Transferência Radiativa: 6S

O 6S foi desenvolvido como uma evolução do modelo escalar 5S (*Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*), que considerava apenas a intensidade total da radiação, desconsiderando sua polarização (distribuição em diferentes direções das ondas eletromagnéticas) — característica comum em modelos escalares. A partir da versão 6SV1, o modelo passou a operar com o vetor de Stokes completo, permitindo simulações vetoriais capazes de representar, além da intensidade, os componentes de polarização linear e circular da radiação eletromagnética. Essa abordagem proporciona maior precisão na modelagem da luz

espalhada na atmosfera, sobretudo em ângulos extremos ou em ambientes com alta concentração de aerossóis (Kotchenova e Vermote, 2007).

A estrutura do 6S baseia-se em três pilares principais. O primeiro é a absorção gasosa, fenômeno pelo qual certos gases atmosféricos — como ozônio (O_3), vapor d'água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4) — absorvem seletivamente a radiação em faixas específicas do espectro eletromagnético. Essa absorção é estruturada no 6S por meio de modelos estatísticos de absorção/comportamento de gases, alimentadas por dados do banco espectroscópico HITRAN (*High-resolution Transmission Molecular Absorption Database*), que contém parâmetros detalhados de absorção para milhares de transições moleculares.

O segundo pilar é o espalhamento atmosférico, simulado por meio do método das ordens sucessivas de espalhamento (*Successive Orders of Scattering* – SOS). Essa técnica permite considerar múltiplas interações da radiação com moléculas e aerossóis, utilizando modelos específicos para diferentes tipos atmosféricos, como continental, marítimo, urbano, queimadas e estratosférico (Vermote et al., 2006).

O terceiro pilar refere-se à contribuição da superfície e da vizinhança, que pode ser representada no 6S como superfície lambertiana — que reflete a radiação igualmente em todas as direções — ou como superfície anisotrópica, modelada por funções BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*), ou seja, como superfícies refletem a luz considerando elementos superficiais vizinhos e condições atmosféricas. Esta última representa com maior fidelidade a realidade de alvos como vegetação, solos secos e áreas urbanas (Vermote et al., 2006).

Além disso, uma das vantagens do modelo 6S em relação a métodos empíricos — como o DOS — está em sua abordagem baseada em princípios físicos. O 6S considera as condições atmosféricas reais no momento da aquisição da imagem, como a concentração de vapor d'água, ozônio e profundidade óptica dos aerossóis (*Aerosol Optical Depth* – AOD), o que permite reduzir significativamente as incertezas em aplicações como classificação espectral, detecção de mudanças e geração de séries temporais (Vermote et al., 2006; Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich, 2012).

Dessa forma, definido o modelo escolhido e após a apresentação de suas principais características introdutórias, espera-se que, com a aplicação do modelo 6S, o resultado obtido seja uma conversão satisfatória dos valores de ND da cena original para valores de reflectância, com acurácia superior àquela alcançada por métodos empíricos, como o DOS, e sem comprometer significativamente a resolução espacial ou espectral da imagem.

Os próximos capítulos abordarão em detalhes os métodos e instrumentos utilizados para operacionalizar o modelo 6S nas cenas adquiridas (Apêndice 1).

3.5 Py6S – Interface Python para o Modelo 6S

Como citado, o uso dos MTRs pode ser um processo trabalhoso, devido à complexidade e à coleta extensa de dados necessária para atender aos seus parâmetros e garantir uma conversão fidedigna.

Para contornar essa limitação, propõe-se o uso da interface Py6S, desenvolvida em linguagem *Python*, como alternativa para reduzir a dificuldade operacional. A integração do modelo ao ambiente de programação amplia sua aplicabilidade ao permitir uma execução simplificada do modelo 6SV: a entrada de parâmetros, a simulação e a extração de saídas relevantes — como reflectância aparente, radiância de caminho, transmitância atmosférica e reflectância de superfície — tornam-se mais acessíveis. Considerando também que, uma vez programadas, as rotinas automatizadas em Python facilitam a correção de dados atmosféricos e a reprodutibilidade.

O Py6S, foi desenvolvido como parte do doutorado do especialista em Sensoriamento Remoto, Robin Wilson, durante seu doutorado na *University of Southampton*, o Py6S foi disponibilizado como software livre sob licença LGPL (*GNU Lesser General Public License*), permitindo uso, modificação e distribuição aberta por meio de repositório no GitHub (Wilson, 2012a).

Diferente de uma reimplementação, o Py6S não altera o núcleo computacional do 6S, mas atua como uma camada de acesso que comunica *scripts* Python diretamente com o executável do modelo. Essa estratégia garante que os resultados obtidos com o Py6S sejam numericamente idênticos àqueles produzidos pelo 6S original, preservando a credibilidade dos *outputs* (Wilson, 2012a).

Desta forma, Wilson (2012a) destaca que o principal objetivo do Py6S é a manutenção da qualidade de seus resultados e acurácia e reduzir a complexidade da interação com o 6S. Isso é obtido através da substituição da interface tradicional que exige a criação manual de arquivos de entrada em formato rígido, compostos por códigos numéricos de difícil interpretação, para um formato onde é possível fazer as parametrizações de forma mais intuitiva diretamente em código Python.

A definição de variáveis de entrada no Py6S, pode ser feita pelo usuário via a configuração de perfis atmosféricos, geometrias de visada, comprimentos de onda e condições

de superfície utilizando comandos intuitivos, como o seguinte exemplo introdutório que Wilson (2012b) disponibiliza em seu site:

```
# Set the wavelength to 0.675um
s.wavelength = Wavelength(0.675)
# Set the aerosol profile to Maritime
s.aero_profile = AeroProfile.PredefinedType(AeroProfile.Maritime)
```

Neste trecho, ele utiliza dois comandos padrões, programados dentro do ambiente Py6S, para definir o comprimento das ondas eletromagnéticas e ele define o perfil de aerossóis suspenso na atmosfera para de um ambiente marítimo, que por sua vez define uma série de outros valores que constituem a análise do 6S (Wilson, 2012b).

O elemento central é a classe SixS, responsável por armazenar os parâmetros de entrada, executar o ambiente Py6S e organizar as saídas. A interação típica com o Py6S segue três etapas principais: definição de parâmetros, execução do modelo e extração de resultados.

A instalação do modelo e recomendações para o uso, podem ser encontrados no Apêndice 2.

3.5.1 Definição de Parâmetros

Os parâmetros que podem ser editados dentro da ferramenta Py6S são apresentados no quadro abaixo:

Quadro 1 - Parâmetros configuráveis do Py6S

Parâmetro	Descrição	Possíveis valores / metodologias
atmos_profile	Define o perfil atmosférico (temperatura, pressão, concentração de gases como vapor d'água e ozônio).	**Predefinidos**: Tropical, Midlatitude Summer, Midlatitude Winter, Subarctic Summer, Subarctic Winter, US Standard 62. **Customizados**: UserWaterAndOzone(H2O, O3) (valores medidos ou obtidos por AERONET, por exemplo).
aero_profile	Define o tipo de aerossol predominante na atmosfera.	**Predefinidos**: Continental, Maritime, Urban, BiomassBurning, Stratospheric. **Customizados**: feitos com medidas locais (ex.: espectrorradiômetros de campo, AERONET).

ground_reflectance	Define a refletância da superfície terrestre observada.	**Lambertian(x)** (Lambertiano) para superfícies isotrópicas (ex.: solos claros). **Hapke, MODIS, BRDF** para superfícies anisotrópicas (ex.: vegetação, áreas urbanas). Valores médios de campo ou bibliotecas espectrais definidas pelo usuário (USGS, ASTER).
geometry	Define a geometria da cena: posição solar e do sensor.	solar_z (ângulo zenital solar), solar_a (azimute solar). view_z (ângulo zenital de visada), view_a (azimute do sensor). Data da cena (mês, dia) para cálculo da posição solar.
aot550	Profundidade óptica dos aerossóis a 550 nm.	Valores obtidos por bases como AERONET ou medidas locais. Intervalo típico: 0.05 (céu limpo) a >1.0 (condições de alta turbidez, queimadas, poluição).
visibility	Distância de visibilidade horizontal em km (relacionada à concentração de aerossóis).	Alternativa ao aot550, usado em condições atmosféricas simples. Ex.: 50 km (limpo), 23 km (médio), 5 km (poluição ou neblina).
altitude	Define altitude do terreno e do sensor.	set_target_custom_altitude(x) em km. set_sensor_satellite_level() para sensor orbital. Altitude do terreno obtida via DEM (SRTM, ALOS, Copernicus GLO-30).
atmos_corr	Método de correção atmosférica a ser aplicado para converter TOA em SR.	AtmosCorr.AtmosCorrLambertianFromRadiance. AtmosCorr.AtmosCorrLambertianFromReflectance. Aplicado quando se deseja que o 6S devolva diretamente valores de Surface Reflectance (SR).

Fonte: Wilson, 2012a. Elaborado pelo autor, 2025.

3.5.2 Acesso e Interpretação dos Resultados Gerados pelo Modelo 6S

Todos os resultados gerados pelo modelo 6S podem ser acessados a partir do atributo `s.outputs`. Os principais valores de saída estão disponíveis em `s.outputs.values`, que funciona como um objeto semelhante a um dicionário Python, no qual as chaves correspondem aos nomes dos parâmetros e os valores armazenam os resultados numéricos (Wilson, 2012b). Frequentemente, os elementos `s.outputs` vão ser acompanhados do comando de terminal `print ()´, que apresenta a finalidade de transformar dados de saída em texto.

O usuário pode visualizar diretamente todos os valores através da função ` print(s.outputs.values)`. Também é possível acessar parâmetros específicos estendendo o código original, por exemplo: `print(s.outputs.values.pixel_radiance)`.

Além disso, o objeto s.outputs.trans armazena os valores de transmitâncias atmosféricas (Rayleigh, vapor d'água, ozônio etc.) como instâncias da classe Transmitância. Essa estrutura organiza os resultados em três tipos: com trajetória descendente (*downward*), ascendente (*upward*) e total (*total*).

```
(I)   from Py6S import *
      s = SixS()
      s.run()
      print(s.outputs.transmittance_rayleigh_scattering)
      print(s.outputs.transmittance_rayleigh_scattering.downward)
      print(s.outputs.transmittance_rayleigh_scattering.upward)
      print(s.outputs.transmittance_rayleigh_scattering.total)
      print(s.outputs.transmittance_water)
```

4 RESULTADOS

4.1 Correção Atmosférica das Imagens Multiespectrais CBERS-4A WPM

No campo do Sensoriamento Remoto, a atividade abordada neste capítulo já se encontra consolidada em diferentes programas orbitais, com metodologias implementadas de forma operacional. Recorrentemente, o programa de satélites Landsat é referenciado, pois o modelo 6S serviu de base para o desenvolvimento do código utilizado no *Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System* – LEDAPS, que realiza rotineiramente correções em cenas dos sensores Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM) e Landsat 7 TM, gerando imagens corrigidas e prontas para uso científico. O único passo a cargo do usuário é a aplicação de um fator de escala padrão, que pode ser realizado na *Raster Calculator* do ArcGIS PRO (ESRI, 2025; USGS, 2025):

$$\text{Fator de Escala} = SR = (DN * 0.0000275) - 0.2 \qquad (V)$$

Para os satélites Landsat 8-9 OLI (*Operational Land Imager*), utiliza-se outro sistema de correção, o *Land Surface Reflectance Code* – LaSRC, baseado em um modelo de

transferência radiativa único (Vermote et al., 2016), ainda mantendo a necessidade de aplicação de fator de escala. De modo semelhante, o Sentinel-2/MSI emprega o processador Sen2Cor, fundamentado em tabelas de *lookup* derivadas do 6S, assegurando consistência com os produtos Landsat em estudos multissensores (Claverie et al., 2018).

No contexto brasileiro, pesquisas pioneiras demonstram a viabilidade de aplicação desses princípios no programa CBERS. A dissertação de Veras (2018) apresentou metodologias de conversão radiométrica e correção atmosférica para o sensor MUX do CBERS-4, enquanto Silva et al. (2019) validaram um produto de reflectância de superfície em escala continental, utilizando observações coincidentes do Landsat-8/OLI. O INPE (2023) informa que, até o momento, os dados de reflectância de superfície estão disponíveis apenas para as câmeras WFI dos satélites CBERS-4, CBERS-4A e Amazonia-1 e para a câmera MUX do CBERS-4, não havendo ainda produtos prontos para a câmera WPM do CBERS-4A.

Considerando a aplicação consolidada do modelo 6S em outros programas, bem como estudos que demonstram sua compatibilidade com satélites do programa CBERS, o método adotado para este trabalho será a correção atmosférica das cenas do CBERS-4A/WPM, utilizando o Py6S aliado ao uso de um fator de escala implementado no ArcGIS Pro (ESRI, 2025) via a função *Raster Calculator*.

O processo inicia-se com a obtenção da cena em nível L4, que já está ortorretificada. Em seguida, passa-se à obtenção dos arquivos XML auxiliares, responsáveis por conter os metadados de cada uma das bandas (PAN, AZUL, VERDE, VERMELHA e NIR).

O arquivo XML é um arquivo de texto que utiliza etiquetas para definir a estrutura e o significado da informação, posteriormente visualizada de forma gráfica. Entre as informações de interesse destacam-se: (i) os coeficientes de calibração absoluta, que permitem a conversão dos NDs em valores de radiância espectral; (ii) os ângulos solares (elevação e azimute), que possibilitam o cálculo do ângulo zenital solar; (iii) a data e a hora da aquisição, necessárias para a determinação da distância Terra–Sol. Para o ESUN, dado que não é disponibilizado nenhum valor específico para o CBERS-4A WPM, utiliza-se os valores disponibilizados por Veras (2022) para o MUX/CBERS-4.

Além disso, a área de abrangência espacial (*bounding box*) da cena é utilizada para a coleta de dados atmosféricos auxiliares e delimitação do espaço para a coleta dos valores de caracterização atmosférica.

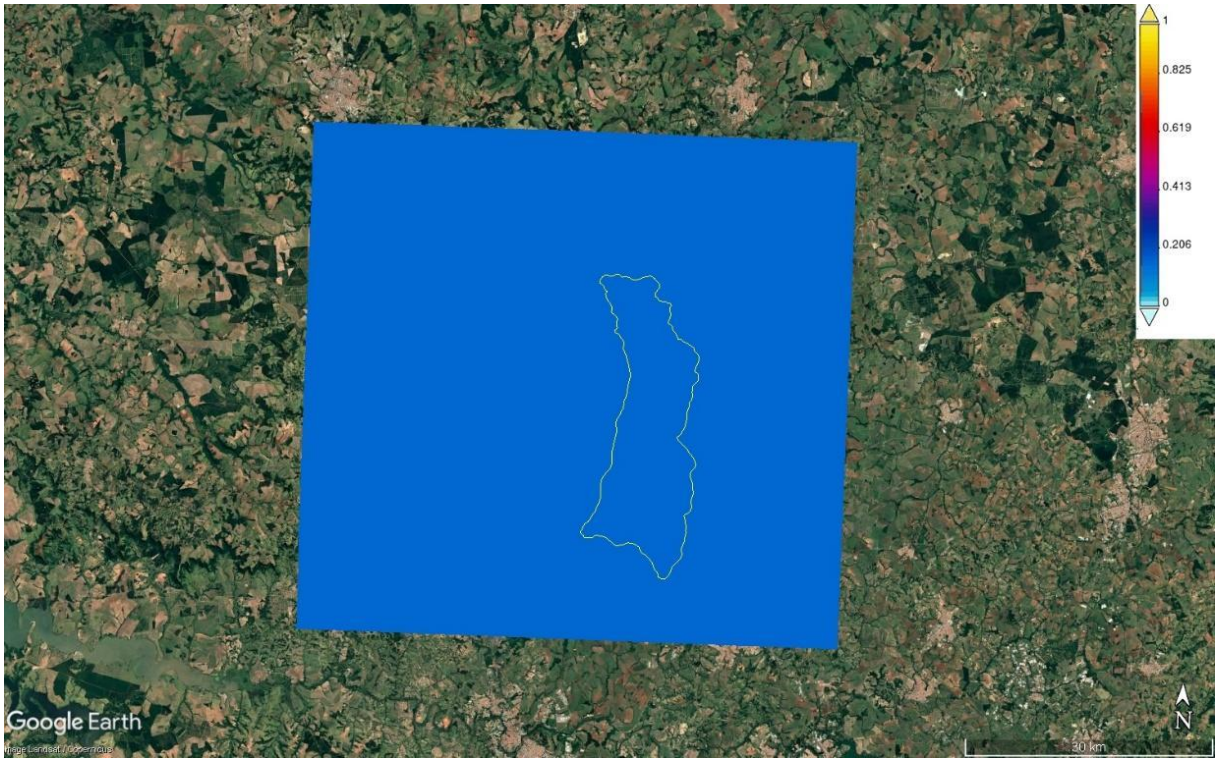
A próxima fase é a caracterização atmosférica, considerada um ponto central no uso de um modelo de transferência radiativa, em contraste com métodos empíricos como o DOS. Nessa etapa, os valores de interesse são a profundidade óptica dos aerossóis (AOD, na banda

de 550 nm), o vapor d'água precipitável e o conteúdo de ozônio. Esses dados podem ser obtidos a partir de sensores como o MODIS, de reanálises atmosféricas globais como o MERRA-2 ou o CAMS, disponíveis nas plataformas AERONET ou o GIOVANNI.

Optou-se pela plataforma GIOVANNI (2025) para a coleta dessas informações, utilizando a abrangência espacial delimitada pelas coordenadas (47,9201 W; 22,5993 S; 47,2876 W; 22,0514 S) e a data exata das cenas selecionadas (16/12/2023). A partir desses parâmetros, foram obtidos os valores de AOD 550 nm, vapor d'água e ozônio. Para os dois primeiros itens, utilizaram-se os resultados do sensor MODIS (MOD08_D3 6.1). Devido à necessidade de disponibilidade de informação para a data exata, o O_3 foi obtido a partir da reanálise do MERRA-2.

Os dados resultantes foram sobrepostos à área de estudo para visualização dos resultados. Sendo assim, consideraram-se os seguintes valores médios para o estudo: AOD 550 nm = 0,145; vapor d'água = 3,344 cm (Figura 16); ozônio = 0,269 atm-cm (Figura 17).

Figura 7 - Valores de AOD 550 nm sobre a bacia hidrográfica do Ribeirão Claro



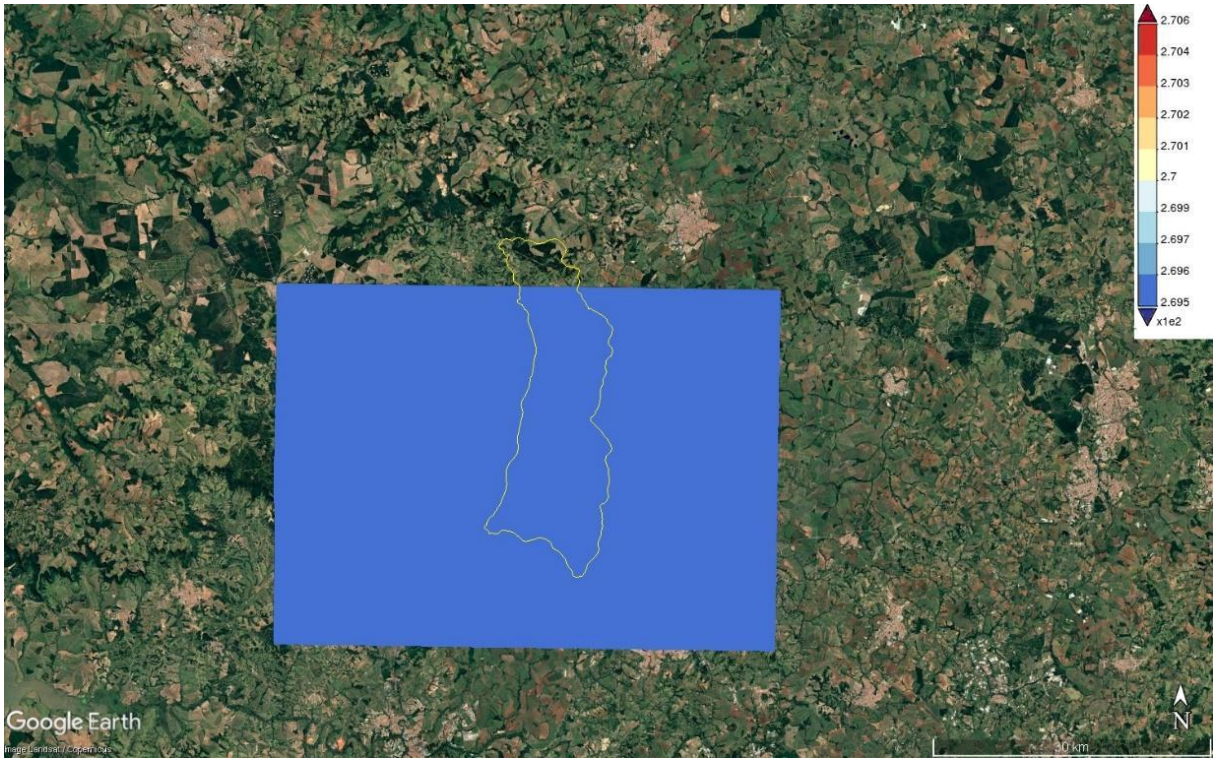
Fonte: GIOVANNI, MOD08 D3, 2025. Imagem elaborado pelo autor.

Figura 8 - Valores de Vapor d’água sobre a bacia hidrográfica do Ribeirão Claro



Fonte: GIOVANNI, MOD08 D3, 2025. Imagem elaborado pelo autor.

Figura 9 - Valores de Ozônio sobre a bacia hidrográfica do Ribeirão Claro



Fonte: MERRA-2. Imagem elaborado pelo autor.

Adicionalmente, determinam-se três macrofatores essenciais para a simulação do modelo de radiância: (i) a altitude média da cena, normalmente obtida por meio de Modelos Digitais de Elevação (MDE) delimitados pela *bounding box*, permitindo caracterizar a espessura óptica da coluna atmosférica sobre a área de estudo; (ii) o tipo de atmosfera parametrizado no sistema Py6S, sendo selecionada a atmosfera continental por corresponder às condições da área de estudo e; (iii) a reflectância de superfície simulada do solo, considerada lambertiana para a área analisada, ou seja, uma superfície que reflete a radiação de forma isotrópica. Conforme Kotchenova e Vermote (2007), para áreas de solo lambertiano constituídas principalmente por grama, pode-se utilizar o valor de 0,25 como parâmetro de referência.

Com isso, agrega-se todas as informações para visualização no quadro abaixo e posterior aplicação em código:

Quadro 2 - Definição de valores de parâmetros essenciais para correção atmosférica

Categoria	**Parâmetro**	**Valor**
Geometria	Bounding Box	-4792006, -22599298, -47287561, -22051401
	Data	16/12/2023
	Hora GMT (Horário do Meridiano de Greenwich)	12:50:52
	Ângulo Solar Zenital	19,168˚
	Azimute Solar	97,47˚
Atmosfera	Tipo	Continental
	AOD (550 nm)	0,145
	Vapor d'água	3,344 cm
	Ozônio	0,269 atm-cm
Topografia	Altitude Média do Terreno	~0,66 km
Espectral	ESUN (azul, verde, vermelho, NIR, PAN)	1958, 1852, 1559, 1091, 1210,49
Solo	Refletância simulada	0,25

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A primeira transformação consiste na passagem dos valores de ND para radiância espectral. Como nos metadados são fornecidos os coeficientes de calibração de forma direta, a fórmula tradicional para conversão é alterada, eliminando os fatores de ganho e *offset* que já estão contidos dentro da calibração:

$$L_\lambda = ND \times Calibração\ Absoluta \quad \text{(VI)}$$

Para obter a Reflectância no topo da atmosfera (TOA), utiliza-se a fórmula:

$$\rho_{TOA} = \frac{\pi \cdot L_0(\lambda) \cdot d^2}{ESUN \cdot cos\ (\theta_{sz})} \quad \text{(VII)}$$

Neste caso, é possível substituir $L_0(\lambda)$ pela equação (VI) para obter o formato final da equação (VIII).

$$\rho_{TOA} = \frac{\pi \cdot ND \cdot Calibração\ Absoluta \cdot d^2}{ESUN \cdot cos\ (\theta_{sz})} \quad \text{(VIII)}$$

Para a resolução desta equação resolveu-se primeiro os elementos constantes da equação (VII) dividido por $cos\ (\theta_{sz})$, criando o fator constante (F)).

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{cos\ (\theta_{sz})} \quad \text{(IX)}$$

$$\rho_{TOA} = \frac{F \cdot Calibração\ Absoluta}{ESUN} \quad \text{(X)}$$

Considerando o ângulo zenital solar de 19,168º e partindo dos valores de *ESUN* separados por banda, define-se o coeficiente de conversão para radiância no topo da atmosfera (K_{TOA}). Os valores de respectivos por banda podem ser observados na Tabela 6.

K_{TOA} opera diretamente multiplicando a cena em número digitais, ou seja, o coeficiente ajustará todos os pixels da respectiva banda do arquivo TIFF, convertendo-os a sua escala e valores para radiância TOA. Portanto, não corresponde a um valor constante, mas sim uma variável que representa a coletânea de pixels que formam a cena de cada banda.

$$\rho_{TOA} = ND \cdot K_{TOA} \quad \text{(XI)}$$

Tabela 6 - Resultados de constantes de reflectância de topo de atmosfera por banda

Banda	**Calibração (Radiância/ND)**	**ESUN (W/m²·µm)**	**K_TOA**
Blue	0,29107	1958	**0,000477**
Green	0,297832	1852	**0,000516**

Red	0,232504	1559	**0,000478**
NIR	0,178993	1091	**0,000526**
PAN	0,184471	1210,49	**0,000489**

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Fazer a conversão TOA para SR, conforme apresentado abaixo. ρ_{SR} representa a reflectância de superfície e ρ_{path} representa a reflectância de caminho. Por sua vez, τ_d se trata da transmitância direta "para baixo", ou seja, do sol a superfície, enquanto τ_u Seria a transmitância que percorre da superfície ao sensor.

$$\rho_{SR} = \frac{\rho_{TOA} - \rho_{path}}{\tau_d \cdot \tau_u} \qquad \text{(XII)}$$

Com todos os dados definidos e identificados os valores necessários para dar continuidade ao estudo, inicia-se a programação. Retomando a explicação sobre o Py6S, o primeiro passo é a abertura do VSCode. O código foi estruturado em blocos, com a inserção dos dados de entrada determinados na Tabela 9. Em seguida, utiliza-se a função `s.run()´ para iniciar a simulação, e funções `print()´, cada uma dedicada a um parâmetro, para exibir os resultados do cálculo.

O arquivo de código, em formato .py, deve ser salvo em um diretório específico do computador. O caminho de acesso (do disco rígido até a pasta escolhida) será posteriormente usado no terminal de comandos. Essa estrutura permite realizar alterações de parâmetros de forma simples e tornar o código iterativo, já que, no terminal, basta ativar o ambiente Py6S via *conda*, acessar o Python e, por fim, usar o comando `cd´ para entrar no diretório que armazena o *script*. As linhas de código estarão disponíveis no Apêndice 3.

Considerando os valores para os parâmetros apresentado na tabela 7, obtêm-se os seguintes resultados por banda:

Tabela 7 - Valores de transmitância e reflectância obtidos através do *script* programado em Py6S

Banda	**Reflectância do caminho (ρ_{path})**	**Transmitância direta (Down) (τ_d)**	**Transmitância direta (Up) (τ_u)**	**Fator Total ($\tau_d \cdot \tau_u$)**
Blue	0,072	0,88462	0,89128	0,7884
Green	0,04	0,92426	0,92905	0,8587
Red	0,023	0,95015	0,95356	0,9060
NIR	0,012	0,96772	0,97005	0,9387

PAN	0,025	0,94465	0,94837	0,8959

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Substituindo os valores obtidos na equação XII e utilizando das cenas convertidas para TOA na função *Raster Calculator* no ArcGIS Pro (ESRI, 2025), os resultados foram as bandas corrigidas para SR (Tabela 8).

Tabela 8 - Intervalos de variação de valores de pixels de acordo com nível de correção

Banda	**Faixa TOA (Var. Pixels)**	**Faixa SR (Var. Pixels)**
Blue	0,0386 – 0,4889	-0,041 - 0,5276
Green	0,0304 – 0,5278	-0,011 -0,5678
Red	0,0038 – 0,4889	-0,021 - 0,5140
NIR	0,0226 – 0,5380	0,011 - 0,5607
PAN	0,0464 – 0,5002	0,023 - 0,5302

Fonte: ESRI, 2025. Elaborado pelo autor.

Dada a existência de valores de SR negativos, possivelmente representado por pixels de corpos d'água ou áreas sombreadas, que não tem uma interpretação física válida, foi necessário aplicar um fator condicional (*con*) à equação de conversão de TOA no *Raster Calculator* para FRB de superfície (XIII). Essa solução busca assemelhar-se a metodologia estipulada para o método DOS que define um valor mínimo para cada banda, assumindo o pressuposto que cada banda da imagem deveria conter alguns pixels com valores próximos ou iguais a zero (Chavez, 1988). O Resultado das imagens convertidas podem ser observadas no Anexo III.

$$Con\left(\left(\left(\frac{\rho_{TOA}-\rho_{path}}{\tau_d \cdot \tau_u}\right)\right) < 0{,}0, \left(\left(\frac{\rho_{TOA}-\rho_{path}}{\tau_d \cdot \tau_u}\right)\right)\right) \qquad \text{(XIII)}$$

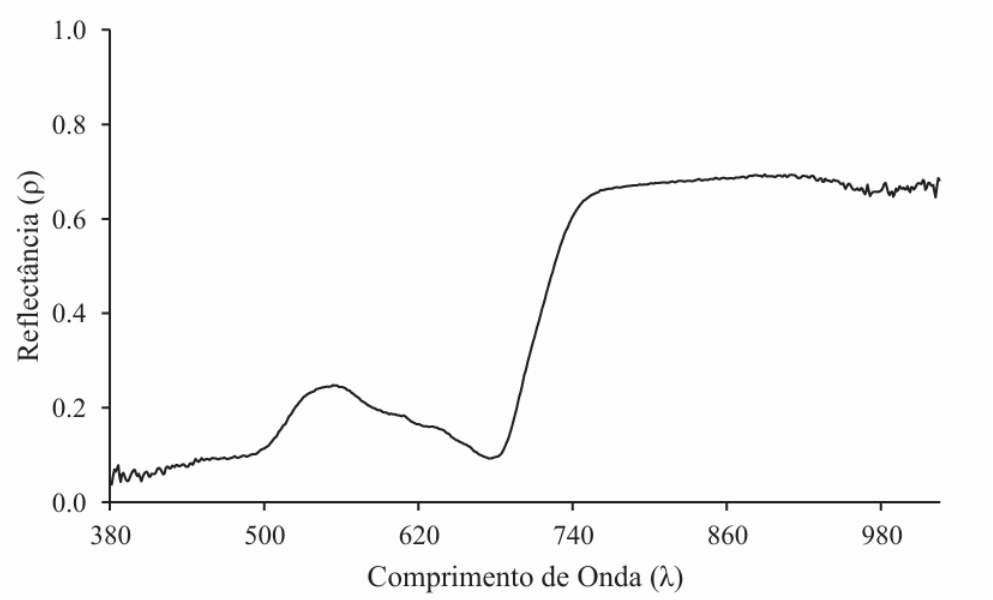
4.2 Delimitação da Assinatura Espectral da leucena no CBERS-4A

4.2.1 Amostragem da Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit.

Com as bandas corrigidas, o resultado esperado é que seja possível analisar a resposta espectral real da leucena, livre das interferências atmosféricas, e delimitar um intervalo claro que represente sua assinatura espectral.

Como apresentado anteriormente, a vegetação apresenta um comportamento espectral típico, caracterizado por baixos níveis de reflectância na região do visível e um pico no infravermelho próximo. Afonso (2016) utilizou em sua pesquisa um espectrorradiômetro para analisar amostras de espécies vegetais, entre elas a leucena, e obter uma assinatura espectral bem definida e registrada dentro do intervalo de sensibilidade de um sensor espectral, resultando em um nível de detalhe elevado (Figura 10).

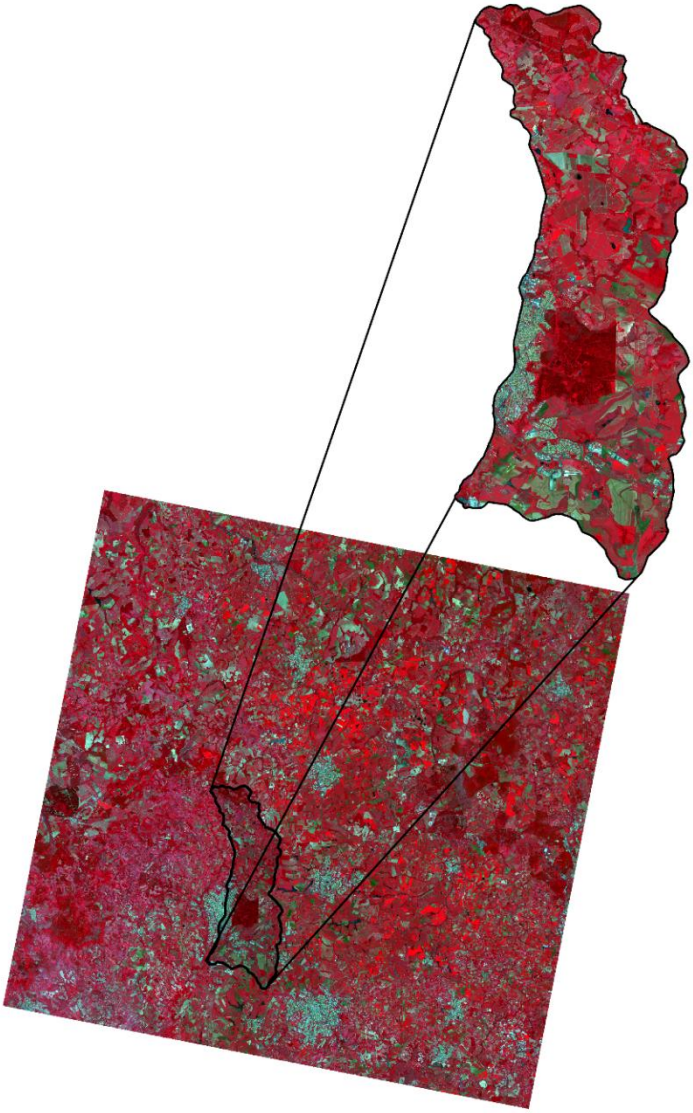
Figura 10 - Assinatura espectral leucena a partir de um espectroradiômetro



Fonte: Afonso, 2016.

Inicialmente, no processo de amostragem, usa-se a função de bandas compostas para obter a composição do infravermelho para facilitar a visualização de dossel e capturar maior quantidade de detalhes no aspecto da vegetação e de sua densidade, utilizando a banda NIR (B4) no vermelho, a banda vermelha (B3) na posição do verde e a banda visível do verde (B2) na posição do azul (Figura 11).

Figura 11 - Composição Infravermelho próximo para destaque de vegetação na cena

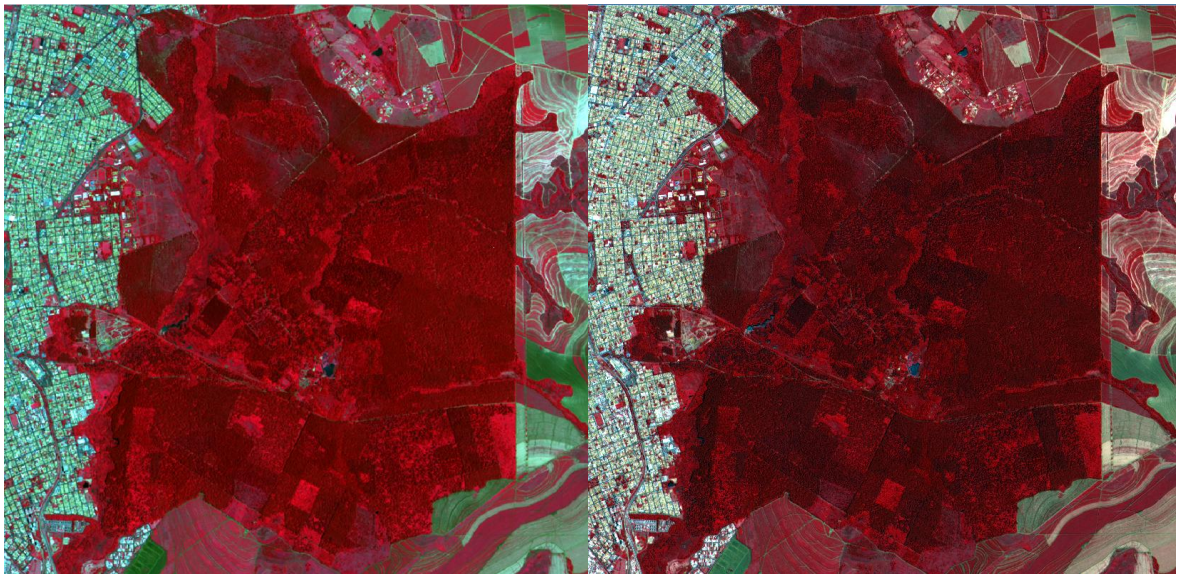


Fonte: INPE, 2025 – CBERS-4A; Bacias hidrográficas, SigRH, 2025. Elaborado pelo autor, 2025.

A chave por trás dessa composição é que a sensitividade da visão humana é maior às cores vermelhas. Em vista disso, aproveita-se essa qualidade para colocar a banda de destaque, ou seja, com maior resposta espectral na coloração vermelha (Meneses, 2012).

Foi utilizado o aperfeiçoamento da resolução espacial através do processo de *pan-sharpening* ou nitidez panorâmica (Figura 12), que consiste no uso de uma cena pancromática de alta resolução espacial para se fundir com uma camada de multibandas (composição) de menor resolução, o produto resultante apresenta a resolução espacial da imagem pancromática e as características espectrais da imagem multiespectral (Vrabel, 1996).

Figura 12 - Aplicação da função nitidez panorâmica sobre o Horto Florestal Edmundo Navarro de Andrade, Rio Claro – SP



Fonte: INPE, 2025 – CBERS-4A. Elaborado pelo autor, 2025.

Uma vez definida a imagem que servirá de base para a coleta de amostras, selecionam-se as áreas que comprovadamente possuem leucena, identificadas por meio de trabalho de campo na área de estudo.

A primeira área localiza-se no bairro Cidade Jardim, no município de Rio Claro, e corresponde a um fragmento de leucenas que pode ser observado na Figura 13.

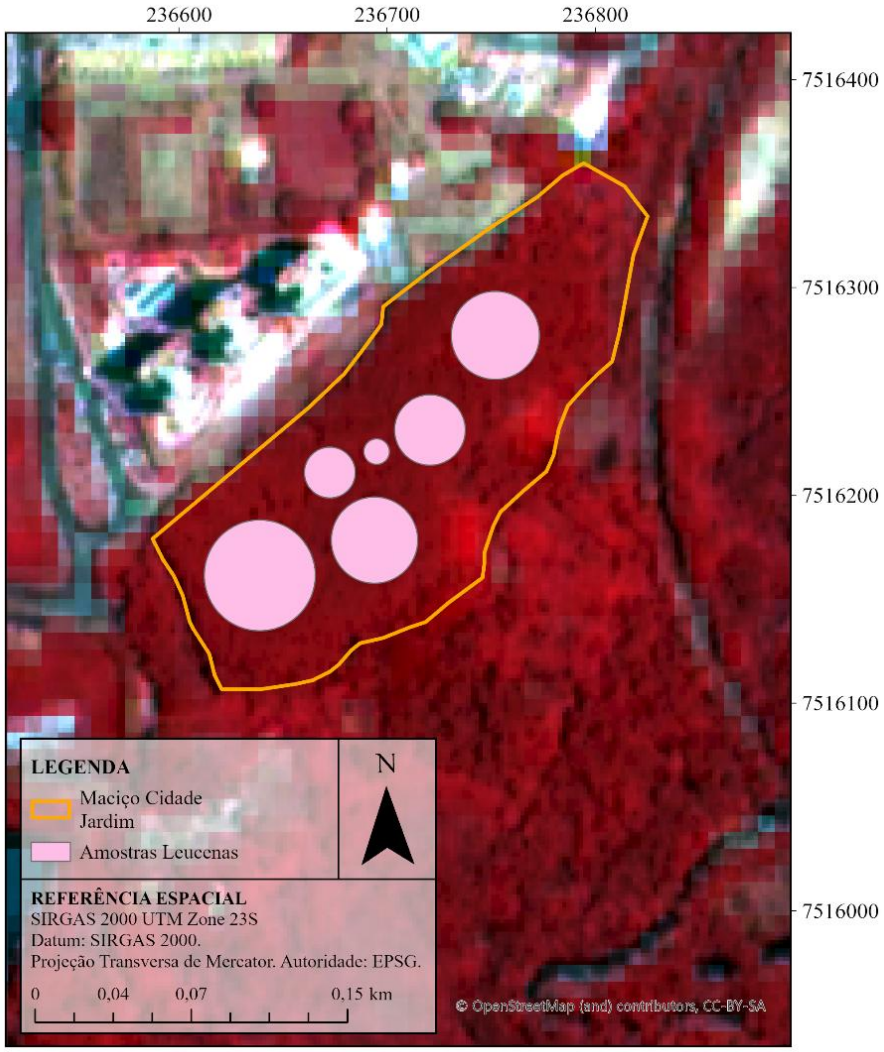
Figura 13 - Maciços de leucenas avistados em trabalho de campo no bairro Cidade Jardim



Fonte: (A) acervo do autor, 2025; (B) Google Earth Pro, 2025.

A Figura 14, apresenta a delimitação da área e os polígonos de amostragem no maciço catalogado em campo.

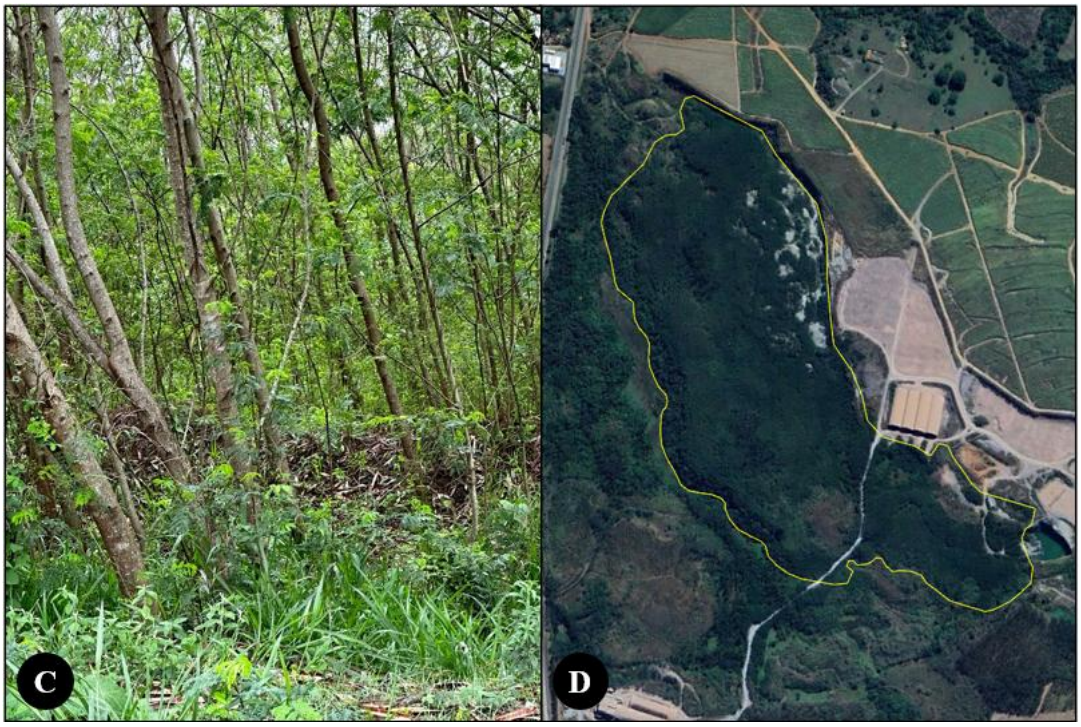
Figura 14 - Maciço de leucena no bairro Cidade Jardim, Rio Claro – SP



Fonte: INPE, 2025 – CBERS-4A. Elaborado pelo autor, 2025.

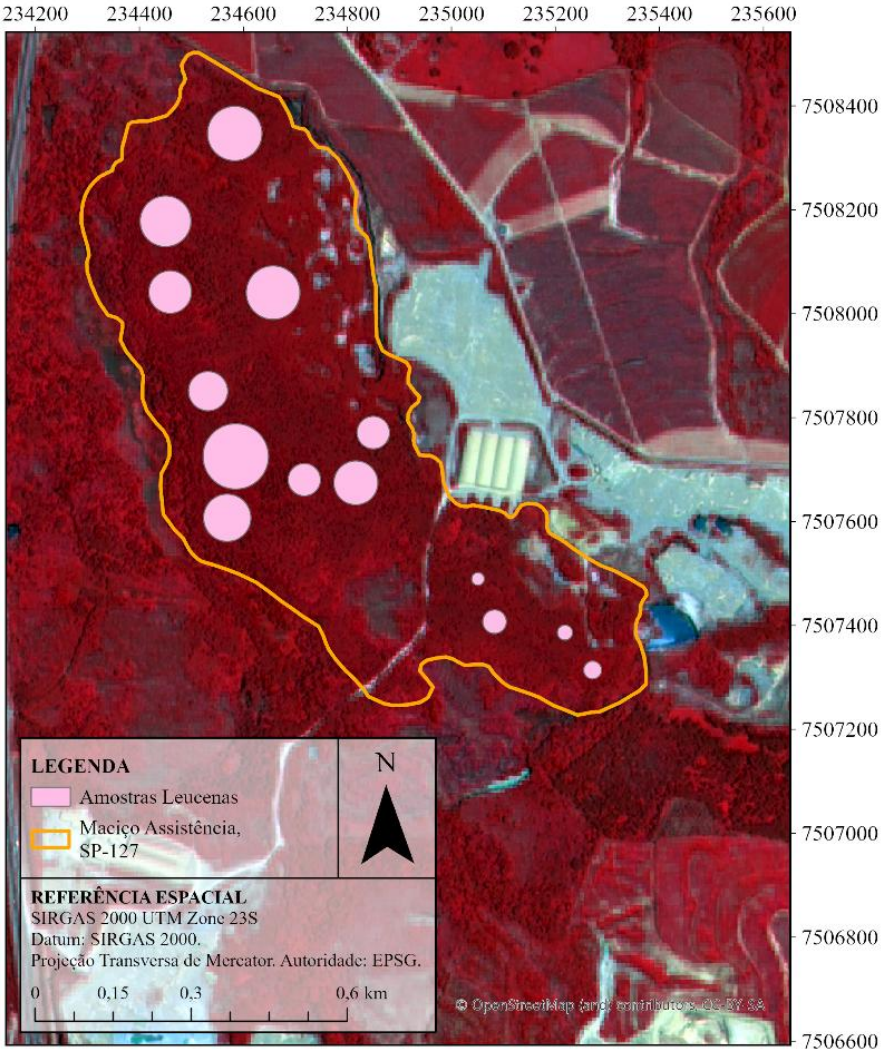
A segunda amostra está situada na zona rural de Rio Claro, à margem da Rodovia Fausto Santo Mauro (SP-127). Trata-se de um maciço de leucena em cava de mineração (Figura 15). Na Figura 16, é apresentada a delimitação do maciço, no ArcGis Pro e os polígonos de amostragem em toda área (ESRI, 2025).

Figura 15 - Maciço de leucena no bairro Assistência, margem da SP-127, Rio Claro – SP



Fonte: (C) acervo do autor, 2025; (D) Google Earth Pro, 2025.

Figura 16 - Maciço de leucenas no bairro Assistência, SP-127, Rio Claro – SP

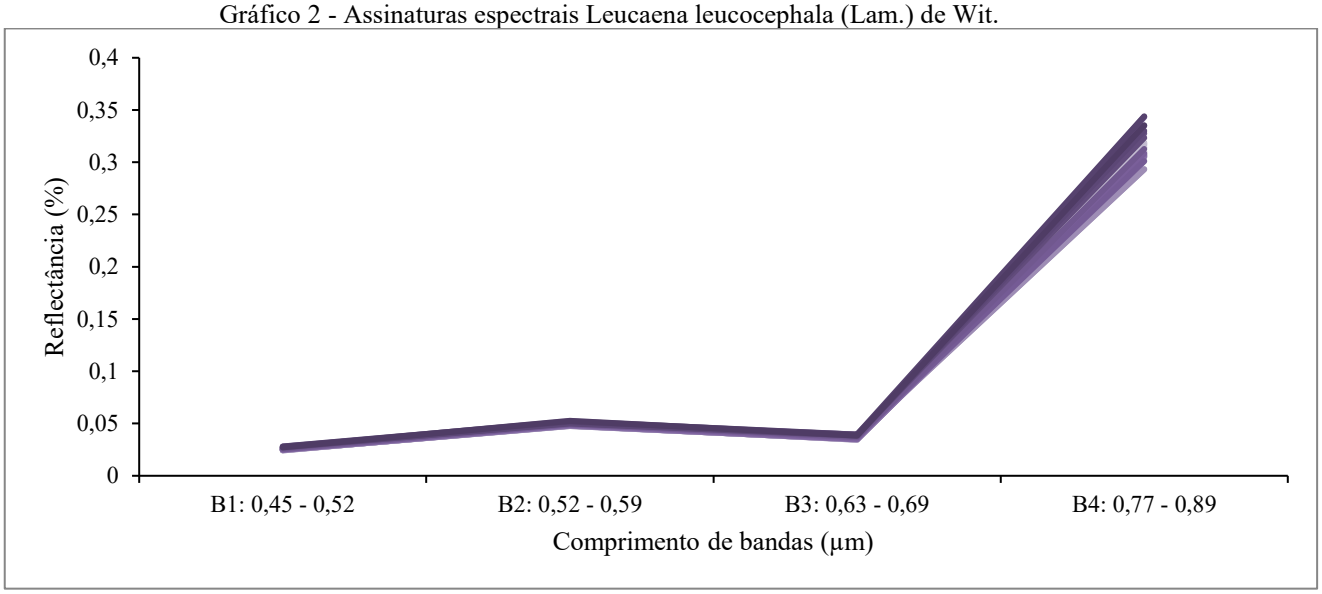


Fonte: INPE, 2025 – CBERS-4A. Elaborado pelo autor, 2025.

Observa-se nas imagens apresentadas que o dossel dos maciços apresenta características mais homogênea e menos porosa, associadas ao porte arbustivo e à florística predominantemente de leucenas. Essas feições refletem a continuidade e a densidade característica da espécie, tornando essas áreas referências fundamentais para o processo de amostragem e análise espectral. Além disso, elas servirão como base comparativa para a identificação de possíveis ocorrências em outras regiões da bacia.

No total, foram selecionados 20 pontos de amostragem com tamanhos variados, que geraram as assinaturas espectrais apresentadas no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Assinaturas espectrais Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Com o conjunto de dados obtidos da amostragem, define-se um limite máximo, mínimo e uma média para cada uma das bandas. Entende-se que, tudo que está contido dentro deste intervalo pode ser considerado uma ocorrência da espécie leucena. Em razão disso, se propõem a utilização de uma fórmula condicional para a categorização de pixels dentro da composição da cena. Para isso, utiliza-se a seguinte fórmula na função *Raster Calculator* (ESRI, 202):

```
(II)  Con (("Blue" >= min_blue) & ("Blue" <= max_blue) & ("Green" >=
      min_green) & ("Green" <= max_green) & ("Red" >= min_red) & ("Red"
      <= max_red) & ("NIR" >= min_NIR) & ("NIR" <= max_NIR))
```

Que pode ser expressa também como:

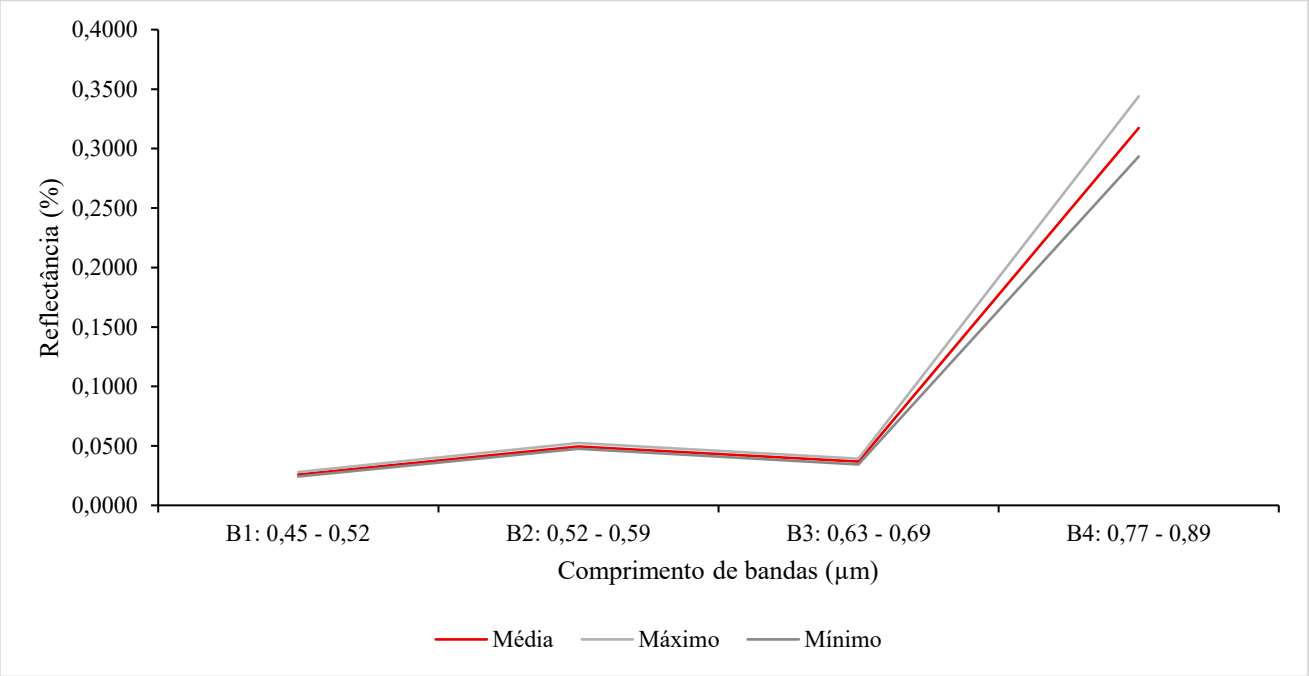
$$Con(x) = \{1, se\ \forall i \in \{Blue, Green, Red, NIR\}, x_i \in [x_{i,min}, x_{i,max}]\ 0, caso\ contrário \quad \text{(XIV)}$$

O resultado desta expressão cria um raster com apenas duas classes – verdadeiro (1) ou falso (0).

O primeiro passo para a elaboração do raster de classificação é a análise de dados, dos máximos, mínimos e da média da seleção de amostras coletadas em relação às suas respectivas respostas espectrais. É elaborada uma base de dados com os valores extraídos para as bandas azul, verde, vermelha e NIR e cada um dos pontos são compilados em uma tabela.

Em seguida, foi elaborado um gráfico de Reflectância por Comprimento de Onda. O gráfico 3 mostra o intervalo representativo da assinatura espectral da leucena em período chuvoso, ao longo do espectro do visível e do infravermelho próximo.

Gráfico 3 - Intervalo da Assinatura espectral Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit.



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

A variância encontrada entre os valores de reflectância durante o espectro do visível e do infravermelho próximo das amostras coletadas estão apresentadas em formato resumido na tabela 9.

Tabela 9 - Limites e médias por banda da assinatura espectral da Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit.

Banda: Comprimento de onda (µm)	**Média**	**Máximo**	**Mínimo**
B1: 0,45 - 0,52	0,0259	0,0280	0,0243
B2: 0,52 - 0,59	0,0496	0,0525	0,0475
B3: 0,63 - 0,69	0,0368	0,0394	0,0345
B4: 0,77 - 0,89	0,3173	0,3439	0,2933

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

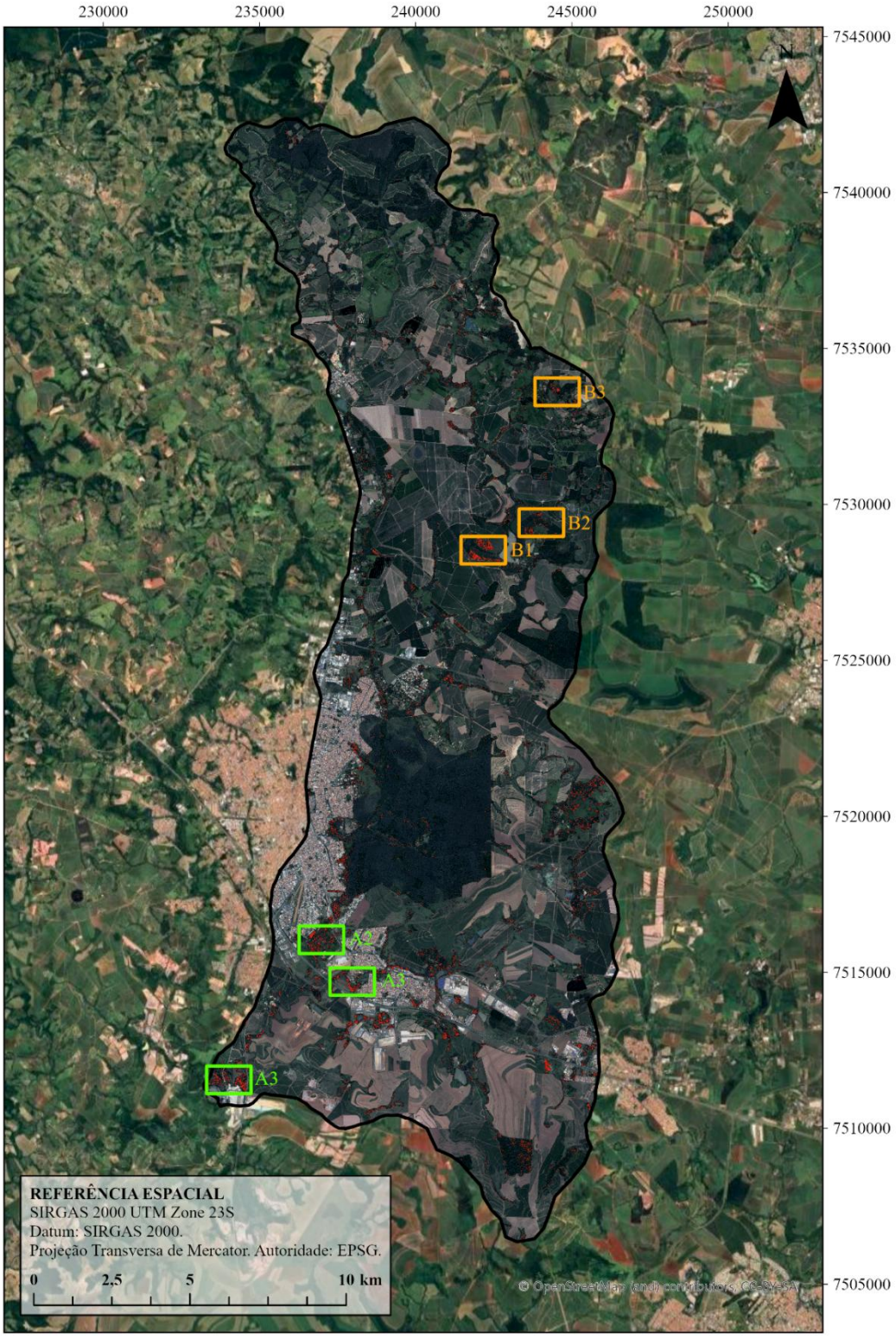
Como esperado, a banda que apresenta maior variância e reflectância é a do infravermelho próximo (NIR), com uma diferença de 0,0506. Da mesma forma, a região do visível, em geral, apresenta variação inferior a 0,0029 entre seus limites, com seu valor mais perceptível sendo na banda 2. Essa resposta confirma o comportamento espectral típico da

vegetação e evidencia baixa interferência de outros elementos superficiais nas regiões amostradas.

Para a etapa de classificação, empregou-se os limites (máximos e mínimos) derivados da correlação da reflectância superficial dos pixels em cada banda espectral, a fim de gerar um raster delimitado pela área de estudo. Nesse raster, aplica-se a classificação binária VII, apresentada anteriormente. Os pixels cujos valores de reflectância das quatro bandas encontram-se dentro do intervalo correspondente à assinatura espectral da leucena recebem o valor "1", indicando presença da espécie; enquanto aqueles fora desse intervalo recebem o valor "0", indicando ausência.

Dessa forma, obtém-se uma representação espacial das regiões que seguem essa regra e que apresentam valores espectrais compatíveis com a espécie estudada, como ilustrado na Figura 17. Para uma melhor visualização, foram propostas algumas áreas de correspondência positiva à assinatura espectral, indicadas em verde, e, em laranja, áreas de incoerência espectral, onde fica evidente a categorização incorreta da espécie.

Figura 17 - Mapa de classificação de indivíduos da espécie leucena bacia hidrográfica do Ribeirão Claro



Fonte: INPE, 2025 – CBERS-4A; bacia hidrográfica, SigRH, 2025. Elaborado pelo autor, 2025.

As Figuras 18 e 19 apresentam o detalhamento das três áreas destacadas em verde, denominadas grupo A referente a resultados positivos da classificação e, em laranja, o grupo B,

referente a imprecisões derivadas do método. Na próxima seção ocorrerá a interpretação e discussão das zonas de interesse.

5 DISCUSSÃO

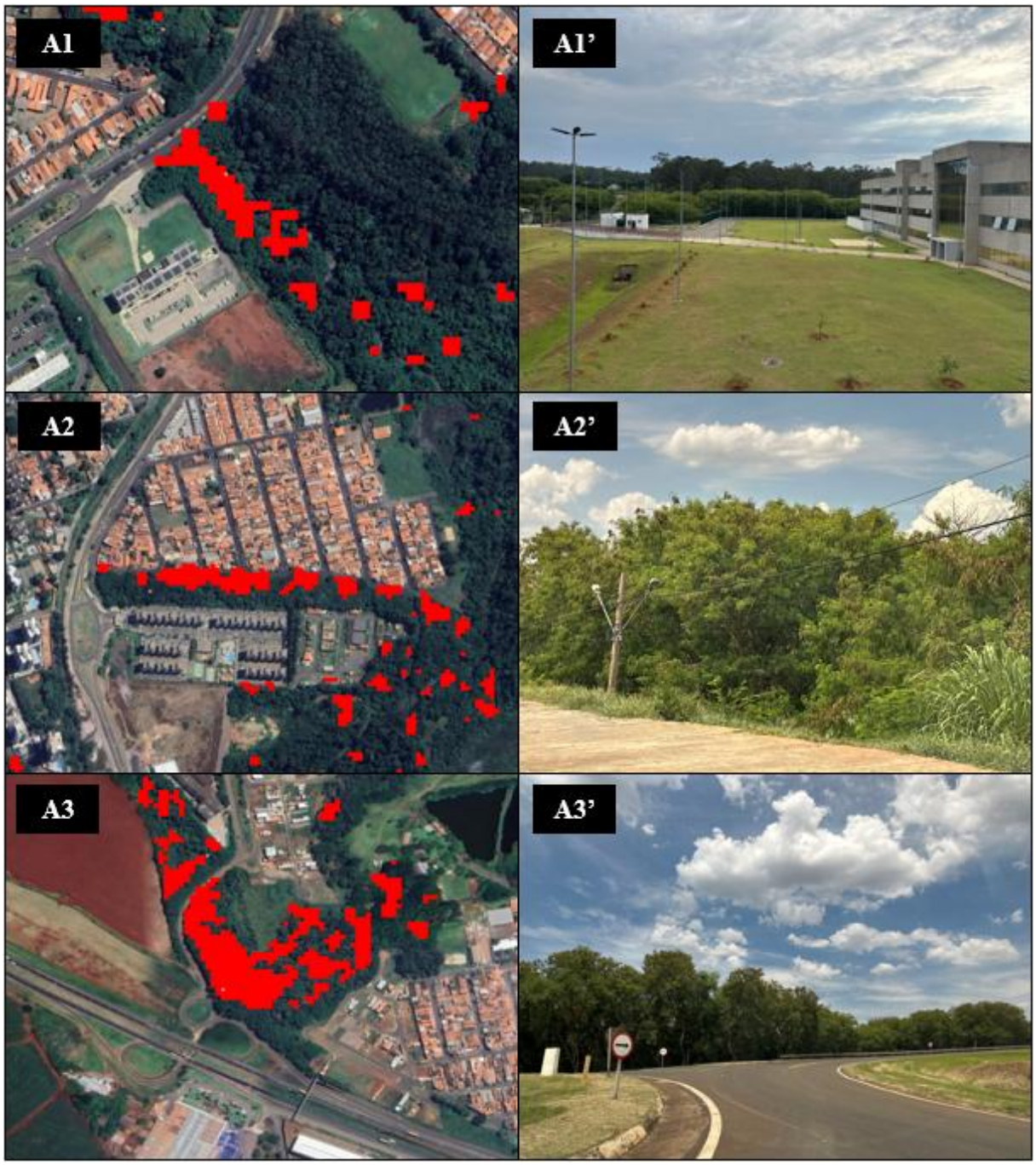
De acordo com a Figura 18, na coluna da esquerda observam-se os pixels classificados como leucena sobre uma imagem de satélite de alta resolução, enquanto à direita aparecem suas correspondentes em imagens capturadas em campo. A área A1 localiza-se na avenida Ulysses Guimarães, no bairro Vila Nova, nas proximidades do Fórum Criminal e Vara da Fazenda Pública de Rio Claro. O maciço da espécie distribui-se ao redor do Fórum, com outros focos distribuídos entre o fragmento de floresta e em direção ao bairro Vila Cristina (sentido superior da imagem). Portanto, para o ponto A1, a classificação espectral apresente correlação positiva para a identificação de indivíduos de leucena e isso fica comprovado com a imagem A1' capturada no local.

O ponto A2 encontra-se entre os bairros da Vila Paulista e do Jardim Horto (porção inferior da imagem) , próxima à segunda verdade de campo, localizada no bairro Assistência e margeando a Rodovia SP-127. Diferentemente dos outros dois pontos, esta área são predominantemente compostos por zonas de mineração de argila, empresas de cerâmica e cultivos de cana-de-açúcar, situando-se diretamente ao longo do Ribeirão Claro.

Observa-se que a principal concentração da leucena está localizada no centro da imagem, apresentando ranhuras internas — áreas descontínuas no maciço — resultantes da presença de corpos hídricos de aspecto pantanoso e vegetação rasteira, que não corresponde à assinatura espectral da espécie. Destaca-se, ainda, o elevado nível de resposta na vegetação de mata ciliar do Ribeirão Claro em determinados trechos.

Por se tratar de uma região composta por propriedades privadas, o acesso a imagens para validação da ocorrência da espécie é limitado. Entretanto, na porção esquerda da imagem, nota-se outra concentração da vegetação estudada. Quando comparada à imagem de satélite de alta resolução, é possível identificar a fisionomia típica de um dossel de leucenas, o que reforça a coerência dos resultados obtidos com a classificação espectral aplicada.

Figura 18 - Áreas de classificação com resposta positiva a Assinatura Espectral na bacia hidrográfica do Ribeirão Claro



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

O recorte A3 corresponde ao trevo da Rodovia Washington Luís (SP-310), que dá acesso ao bairro Jardim Residencial Indaiá, Santa Gertrudes. Nessa rotatória, observa-se uma área de alta incidência da espécie, que se estende até o outro lado da via de acesso ao bairro. Nota-se uma alteração na fisionomia da vegetação circundante, caracterizada por um dossel pouco rugoso e de aparência homogênea, aspecto típico da leucena. Também são identificadas

duas outras concentrações principais: uma próxima a duas lagoas artificiais, no canto superior direito da imagem, e outra à esquerda do núcleo principal, mais próxima ao bairro urbano na porção superior.

Nas demais porções da cena, há ocorrências pontuais da espécie em áreas de vegetação mista. Observa-se que, quanto mais afastadas de rodovias, empreendimentos e cursos d'água, maiores as chances de essas ocorrências estarem associadas à expansão natural da espécie, decorrente da dispersão de sementes, e não a ações de recuperação ambiental ou plantio direcionado.

Essas observações reforçam o padrão de ocupação da leucena, indicando uma tendência de colonização espontânea em áreas abertas e antropizadas, especialmente nas proximidades de infraestrutura viária.

A imagem A3' comprova a presença do maciço de leucenas na margem da rotatória de acesso, conforme indicado pela classificação espectral.

Agora, em relação aos pontos que demonstraram baixa confiabilidade nos resultados, tem-se o grupo B. As três cenas (Figura 19), em geral, apresentam o mesmo tipo de desvio: a classificação incorreta de áreas agrícolas como ocorrências de leucena. Essa interferência é mais evidente em fruticulturas — especialmente laranjais — e, em alguns casos, em trechos de cana-de-açúcar sadia. Esse erro torna-se visível porque os pixels classificados como positivos se ajustam precisamente ao formato das lavouras. Supõe-se que, quando determinadas culturas, sobretudo arbóreas, atingem um estágio avançado de desenvolvimento e se encontram em condições fisiológicas saudáveis, sua resposta espectral pode coincidir com o intervalo de reflectância característico da leucena, gerando falsos positivos.

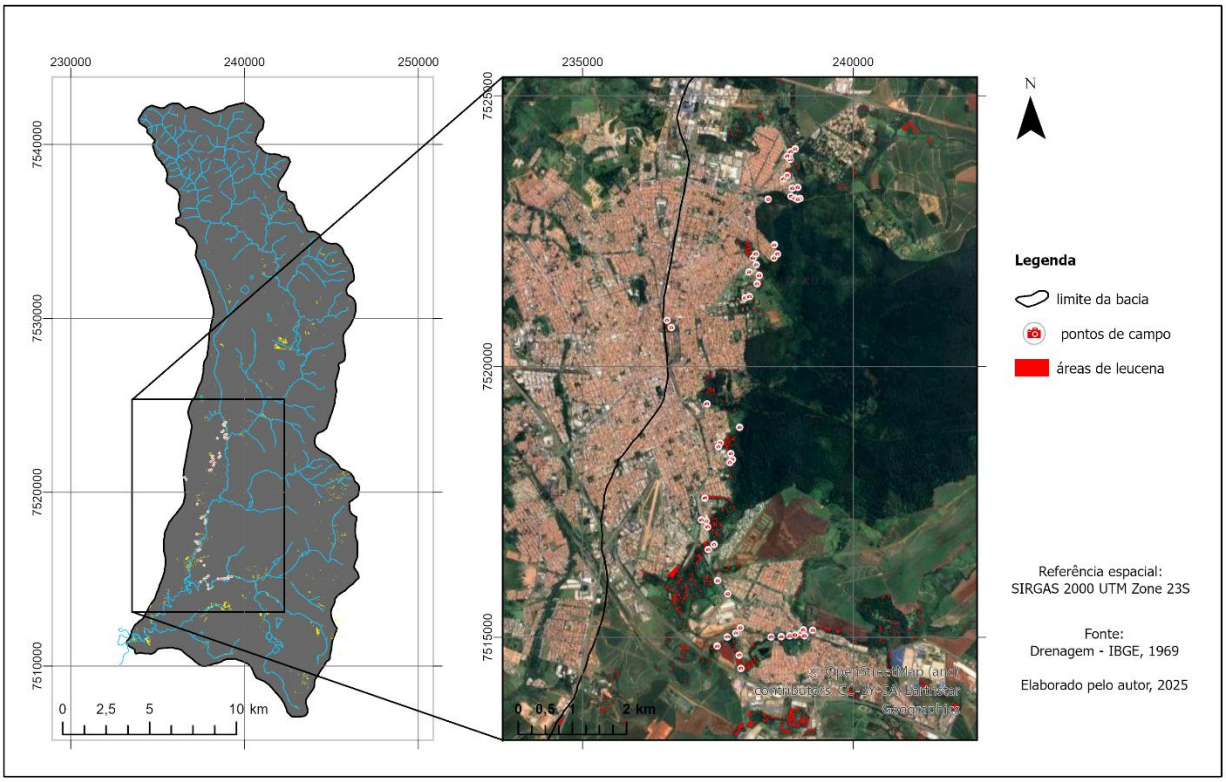
Figura 19 - Áreas de classificação com resposta negativa a assinatura espectral na bacia hidrográfica do Ribeirão Claro



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Por fim, quando analisado o *raster* de classificação espectral contra os pontos checados em campo, é estimado o acerto 69,64%, em vista que foram catalogados um total de 56 pontos (Figura 20), onde 39 tiveram uma correlação positiva e 17 pontos negativas (30,36%). Os resultados negativos obtidos dentre estes pontos específicos, foram 14 pontos onde houve falha de não classificação, ou seja, de fato ocorria a leucena, porém não foi identificada e, 3 pontos onde foi classificado incorretamente como leucena outra espécie vegetal.

Figura 20 - Pontos de captura de imagem de áreas de leucena na bacia hidrográfica do Ribeirão Claro



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos com o processo de correção atmosférica foram expressivos. A aplicação do modelo 6S ao sensor WPM do CBERS-4A, ainda pouco explorada em publicações científicas nacionais, demonstrou compatibilidade com metodologias tradicionalmente aplicadas a sensores como o OLI/Landsat-8.

Da mesma forma, nesse processo o Py6S desempenhou um papel estratégico, que combinado com as bases de dados atmosféricos AERONET e GIOVANNI, foi possível seguir com o processo de correção atmosférica pela metodologia 6S e gerar um produto corrigido com um resultado adequado para análises de reflectância. Em vista disso, afirma-se que o processo de conversão de números digitais para reflectância de superfície no satélite CBER-4A foi alcançada e o segundo objetivo técnico de criar um *script* de programação reprodutível para a realizar a correção também foi atingido através do Py6S.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o objetivo principal proposto para este trabalho foi alcançado, demonstrando que é viável realizar o mapeamento de maciços de leucenas por meio das técnicas de Sensoriamento Remoto aplicadas neste estudo. Entretanto, é importante destacar que o resultado obtido pode ser aprimorado. Em vista que, aspectos como

fenologia, variabilidade temporal e áreas de sombra influenciaram a resposta espectral e contribuíram para o surgimento de falsos positivos em casos específicos.

Outro ponto que merece destaque é a influência da resolução espectral do satélite utilizado. Embora o CBERS-4A apresente resolução espectral reduzida quando comparado a sensores tradicionalmente empregados nesses tipos de estudo, sua elevada resolução espacial atenua parcialmente essa limitação ao permitir maior detalhamento estrutural do dossel. No momento, conclui-se que essa concessão não valeu a pena, dado que, a identificação de uma espécie específica em meio à vegetação é uma tarefa complexa que exige maior resolução espectral para captar as variabilidades intrínsecas da cobertura vegetal. Nesse sentido, conforme recomenda a literatura, sugere-se a utilização de sensores hiperespectrais ou espectrorradiômetros associados a imagens orbitais de alta resolução, de modo a aprimorar a distinção espectral da espécie mapeada.

Para próximos trabalhos sugere-se:

- Aplicar o método com maior quantidade de amostras, de modo a obter uma assinatura espectral preliminar mais estruturada, restritiva e menos suscetível à interferência de espécies com comportamento espectral semelhante;
- Repetir o método em diferentes épocas do ano e diferentes regiões, a fim de capturar a influência da sazonalidade sobre a resposta espectral da espécie, considerando variações fenológicas e climáticas que impactam diretamente o comportamento espectral da vegetação.;
- Utilizar um espectrorradiômetro ou câmera hiperespectral, registrando mais de um indivíduo e em diferentes períodos do ano e em diferentes regiões, para construir um banco local de assinaturas espectrais por fenofase que possa ser utilizado como base para o método de classificação;
- Pesquisar novas formas de avaliar as correções atmosféricas aplicadas às imagens, comparando o 6S com outros métodos consolidados na área, para verificar ganhos de acurácia e consistência entre metodologias;
- Aplicar métodos de classificação mais avançados, fundamentados em machine learning ou *deep learning* — como *Support Vector Machine* (SVM), *Random Forest* ou XGBoost — que podem oferecer maior desempenho na distinção espectral entre classes semelhantes, em comparação a classificação condicional por limites;

- Aplicar o método em outros satélites que apresentem maior profundidade espectral e resolução espacial mais adequada, ou explorar a possibilidade fusão de dados do CBERS-4A com outro sensor que o complete e aprimore a classificação.

REFERÊNCIAS

AFONSO, F. P. L. A. **Identificação de espécies de vegetação em imagens de satélite de alta resolução**. 2016. Mestrado em Engenharia Cartográfica – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: < https://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/123456789/9192?mode=full>. Acesso em: 26 de maio de 2025.

ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 39 (3), p. 9-75, 2018.

ALVES, J. S.; REIS, L. B. O.; SILVA, E. K. C.; FABRICANTE, J. R.; SIQUEIRA FILHO, J. A. leucena (Lam.) de Wit. **Plantas exóticas e exóticas invasoras da Caatinga.** Florianópolis: Bookes, 2014. v. 4, p. 13-18, 2013.

ANACONDA. **Anaconda.Navigator**. Versão.2.2.0, Anaconda Inc. Austin – TX, Estados Unidos, 2025. Disponível em: < https://anaconda.org/>. Acesso em: 03 de dezembro de 2025.

BAPTISTA, G. M. M. **Sensoriamento Remoto hiperespectral**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2019. *E-book*. Disponível em: https://plataforma.bvirtual.com.br. Acesso em: 27 de abril de 2025.

BRASIL, CEMADEN. **Mapa interativo da rede observacional para monitoramento de risco de desastres naturais do CEMADEN**. São José dos Campos: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2025. Disponível em: <https://mapainterativo.cemaden.gov.br/>. Acesso em: 03 de março de 2025.

BRASIL, SNIF. **Conhecendo sobre as florestas**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2025. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/temas-florestais/recursos-florestais/conhecendo-sobre-as-florestas>. Acesso em: 03/11/2025.

CAMPBELL, James B.; WYNNE, Randolph H. **An Introduction to Remote Sensing**. 5. ed. New York: Guilford Press, 2011.

CASSOL, H. L. G; GOMEZ, A. A. Espectrorradiometria como auxílio na diferenciação de espécies com características botânicas muito similares: Eugenia rostrifolia. D. Legrand e Eugenia ramboi D. Legrand. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Foz do Iguaçu, Paraná, PR, Brasil, INPE, p. 3074-3081, 13 a 18 de abril de 2013.

ELTON, C. S. **The Ecology of Invasions by Animals and Plants**. 2 ed. Suíça: Springer Cham, 2020.

COSTA, J. N. M. N.; DURIGAN, G. leucena (Lam.) de Wit (Fabaceae): invasive or ruderal? **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 34, n. 5, p. 825-833, 2010.

DARWIN, Charles. **A Origem das Espécies, no meio da seleção natural ou a luta pela existência na natureza**, 1 vol., tradução do doutor Mesquita Paul. LELLO & IRMÃO – EDITORES, 2003.

EPTV 1, **Projeto busca combater espécie considerada 'praga de árvores nativas' na região de Piracicaba**. G1, Piracicaba, 27 de novembro de 2019. Disponível em: < https://g1.globo.com/sp/piracicaba-regiao/noticia/2019/11/27/projeto-busca-combater-na-regiao-de-piracicaba-a-especie-leucena-considerada-praga-de-arvores-nativas.ghtml>. Acessado em: 27 de abril de 2025.

ESRI. **ArcGIS Pro**. Versão 3.4.0. Esri Inc. Redlands – CA, Estados Unidos, 2025. Disponível em: <https://www.esri.com/pt-br/arcgis/products/arcgis-pro/overview>. Acesso em: 03 de dezembro de 2025.

EUROPEAN SPACE AGENCY. **Eduspace: Disasters**. Disponível em: <https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Disasters_EN/SEM5RTYE1PH_1.html>. Acesso em: 03 de dezembro de 2025.

FORZZA, R. C. et al. **Catálogo de plantas e fungos do Brasil**. Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson Estúdio; Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2010. 2 v. il.

FORZZA, R. C., et al. New Brazilian Floristic List Highlights Conservation Challenges, **BioScience**, v. 62, Issue 1, January 2012, Pages 39–45, https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.1.8.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Araras: folha SF-23-M-II-3**. Escala 1:50.000. Rio de Janeiro: IBGE, 1969a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/folhas-topograficas/15809-folhas-da-carta-do-brasil.html?=&t=downloads>. Acessado em: 02 de dezembro de 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Corumbataí: folha SF-23-Y-A-I-2**. Escala 1:50.000. Rio de Janeiro: IBGE, 1969a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/folhas-topograficas/15809-folhas-da-carta-do-brasil.html?=&t=downloads>. Acessado em: 02 de dezembro de 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio Claro: **folha SF-23-M-I-4. Escala 1:50.000**. Rio de Janeiro, Brasil: IBGE, 1969b. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/folhas-topograficas/15809-folhas-da-carta-do-brasil.html?=&t=downloads>. Acessado em: 02 de dezembro de 2025.

INPE. **Câmeras imageadoras**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos – SP, Brasil. 2024a. Disponível em: < https://www.gov.br/inpe/pt-br/programas/cbers/sobre-o-cbers-1/cbers-04a/cameras-imageadoras>. Acessado em: 27 de abril de 2025.

INPE. **Comentários Sobre a Geração de Imagens de Reflectância**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos – SP, Brasil. 2024b. Disponível em: < http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/catalogo-cbers-amz-1>. Acessado em 02 de dezembro de 2025.

INPE. **CBERS-4A**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos – SP, Brasil. 2019. Disponível em: < http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/catalogo-cbers-amz-1>. Acesso em 02 de dezembro de 2025.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução, 2ª ed., Parêntese Editora, São José dos Campos – SP, Brasil, 2009.
KOTCHENOVA, S. Y.; VERMOTE, E. F. **Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data**. *Part I: Path radiance*. Applied Optics, v. 46, n. 20, p. 5068–5082, 2007.

LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W., CHIPMAN, J. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 7 ed., John Wiley & Sons, Hoboken – NJ, Estados Unidos, 2015.

MARTELLI, A., Sá, L. A. D. de, & Samudio, E. M. M. (2020). **Redução da biodiversidade pela proliferação de leucena e formas de contenção e controle desenvolvidos no município de Itapira-SP** / Reduction of biodiversity by the proliferation of leucena and forms of containment and control developed in the municipality of Itapira-SP. *Brazilian Journal of Technology*, *3*(1), 33–47. https://doi.org/10.38152/bjtv3n1-001

MENESES, Paulo & Almeida, Tati. (2012). **INTRODUÇÃO AO PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO**. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Brasília, 2012.

MORO, Marcelo Freire; SOUZA, Vinicius Castro; OLIVEIRA-FILHO, Ary Teixeira de; QUEIROZ, Luciano Paganucci de; FRAGA, Claudio Nicoletti de; RODAL, Maria Jesus Nogueira; ARAÚJO, Francisca Soares de; MARTINS, Fernando Roberto. **Alienígenas na sala: o que fazer com espécies exóticas em trabalhos de taxonomia, florística e fitossociologia?** *Acta Botanica Brasilica*, Sociedade Botânica do Brasil, 2012.
PENTEADO, Margarida Maria. **Geomorfologia do setor centro-ocidental da depressão periférica paulista**. USP, Instituto de Geografia, v. 2, São Paulo – SP, 1976.

NASA. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center. **GIOVANNI**: Interactive Online Data Visualization System. Greenbelt, MD, Estados Unidos: NASA, 2025. Disponível em: < https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=TmAvMp&starttime=&endtime=>. Acesso em: 30 de maio de 2025.

NASA. **Aerosol Robotic Network (AERONET)**. Greenbelt, MD, Estados Unidos: NASA, 2025. Disponível em:< https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>. Acesso em: 30 de maio de 2025.

PONZONI, Flávio Jorge; SHIMABUKURO, Yosio Edemir; KUPLICH, Tatiana Mora. **Sensoriamento Remoto da vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. *E-book*. Disponível em: https://plataforma.bvirtual.com.br. Acesso em: 27 abr. 2025.

Prefeitura Municipal de Rio Claro. **Diagnóstico Ambiental e Desenvolvimento de Sistemas de Implementações de Projetos de Recuperação da Qualidade dos Corpos d'água**. EcosBio, volume III, p. 3 – 81, Rio Claro, SP, 2014.

PROGRAMA REFLORA. **Flora e Funga do Brasil.** Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: < http://floradobrasil.jbrj.gov.br/ >. Acesso em: 27 de abril de 2025.

PROJETO PRÓ ESPÉCIES. **ESTRATÉGIA NACIONAL PARA ESPÉCIES EXÓTICAS INVASORAS**. MMA (Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima), Brasília, 2019.

SÃO PAULO. Lei nº 16.337, de 14 de dezembro de 2016. Institui normas para a identificação, controle e fiscalização de espécies exóticas invasoras no Estado de São Paulo. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, São Paulo, 15 dez. 2016.

SÃO PAULO. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. Comitê Coordenador do Plano Estadual de Recursos Hídricos. **Plano Estadual de Recursos Hídricos 2004–2007: UGRHI 05 – Piracicaba/Capivari/Jundiaí**. São Paulo, 2007.

SILVA, M. O.; ANDRADE A. C. Geração de imagens de reflectância de um ponto de vista geométrico. **Revista Brasileira de Geomática**, Pato Branco – PR, Brasil, v.1, n.1, p. 23-30, dez/2023.

SISTO, Felipe Pereira. **Estudo da vulnerabilidade dos solos na bacia hidrográfica do Ribeirão Claro - SP** / Felipe Pereira de Sisto. - Trabalho de conclusão de curso (Geologia) Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2016.

USGS. United States Geological Survey. **How do I use a scale factor with Landsat Level-2 science products?** Sioux Falls – SD, Estados Unidos, 2025. Disponível em: < https://www.usgs.gov/faqs/how-do-i-use-a-scale-factor-landsat-level-2-science-products>. Acesso em: 03 de dezembro de 2025.

VERMOTE, E. et al., **Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum - Vector (6SV)**. *User Guide Version 3*. Department of Geography, University of Maryland, Maryland – Estados Unidos, 2006.

VITOUSEK, P. M. et al. **Biological Invasions as Global Environmental Change**. American Scientist. Volume 84, Issue 5, p.218-228, 1996.

WIESEL, P.G., et al. **Integrating remote sensing and UAV imagery for detection of invasive *Hovenia dulcis* Thumb. (Rhamnaceae) in urban Atlantic Forest remnants**. Springer Nature, Suíça, v. 197, p. 1-18, 2025.

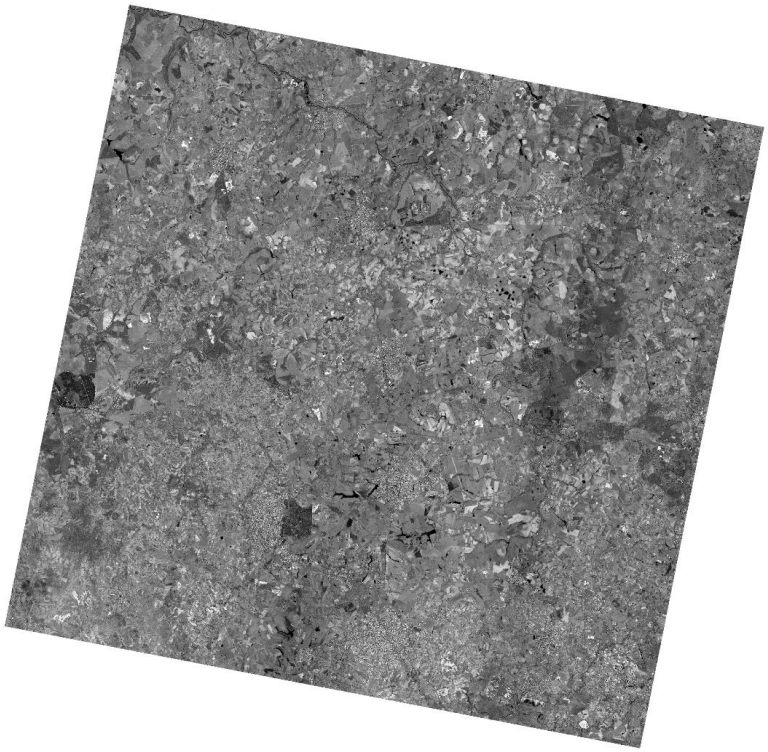
Wilson, R. T., 2013, Py6S: **A Python interface to the 6S radiative transfer model**, Computers and Geosciences, 51, p. 166-171.

Zenni et al. (2022). **Plant Invasions in South America**. In: CLEMENTS, David R. et al. (eds.). *Global Plant Invasions*. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2022. p. 187-204.

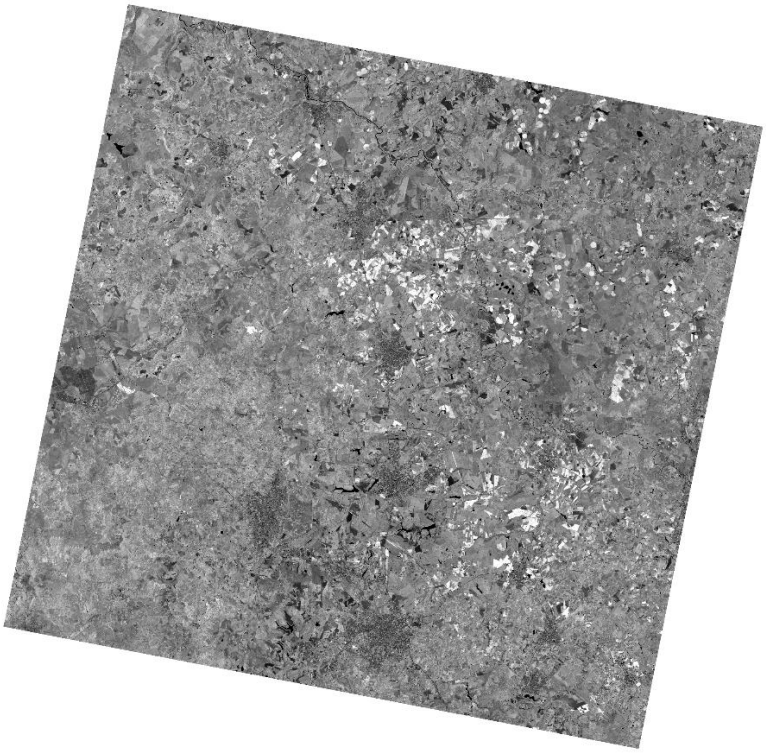
APÊNDICES

Apêndice 1: Cenas CBERS-4A WPM L4

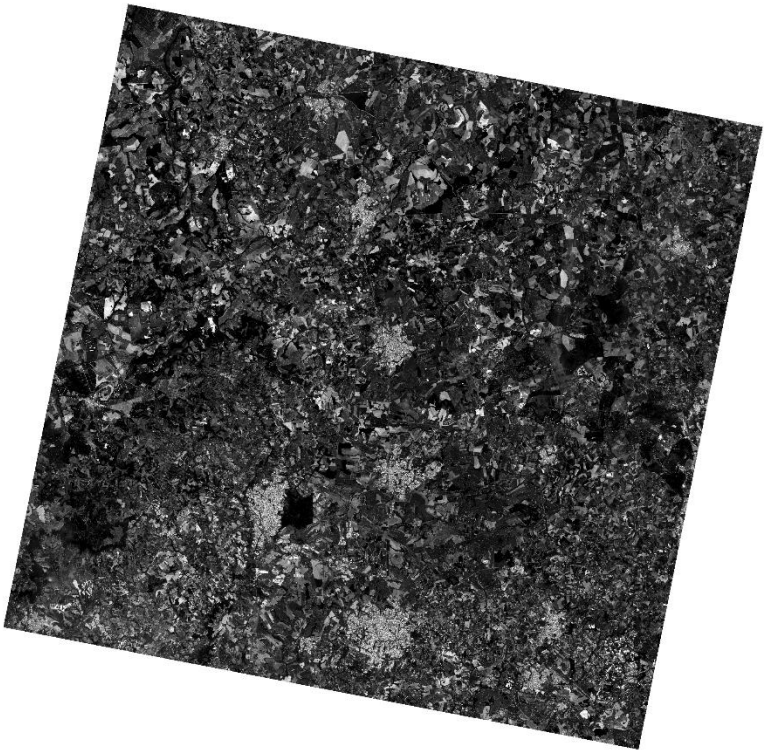
BANDA PANCROMÁTICA: CBERS_4A_WPM_20231216_204_141_L4_BAND0



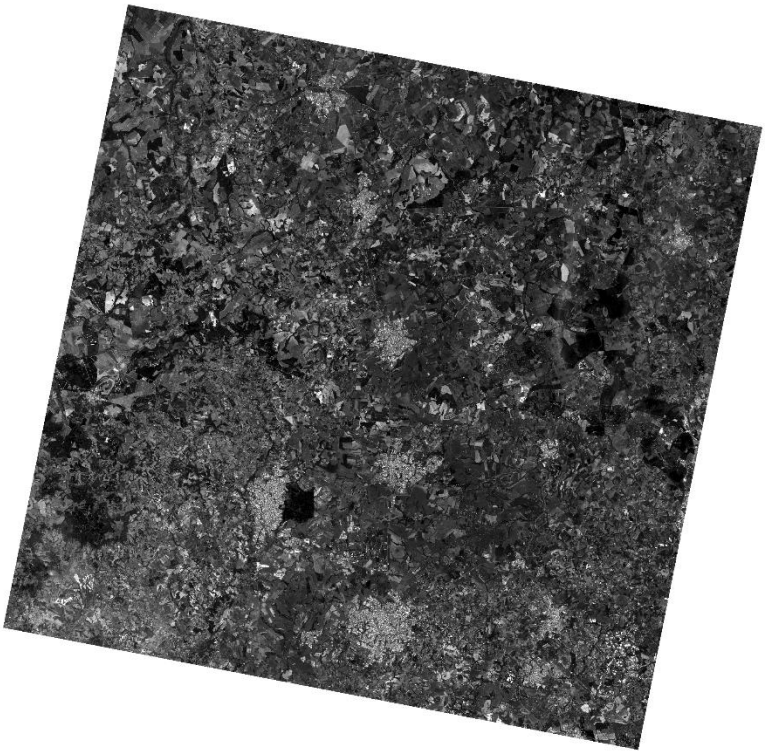
BANDA INFRAVERMELHO PRÓXIMO: CBERS_4A_WPM_20231216_204_141_L4_BAND4



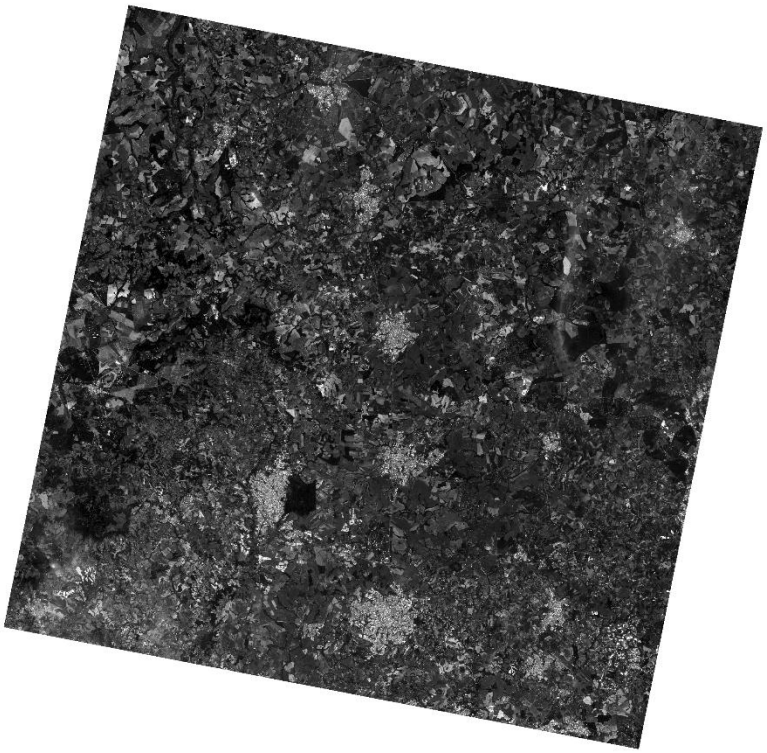
BANDA VERMELHO: CBERS_4A_WPM_20231216_204_141_L4_BAND3



BANDA VERDE: CBERS_4A_WPM_20231216_204_141_L4_BAND2



BANDA AZUL: CBERS_4A_WPM_20231216_204_141_L4_BAND1



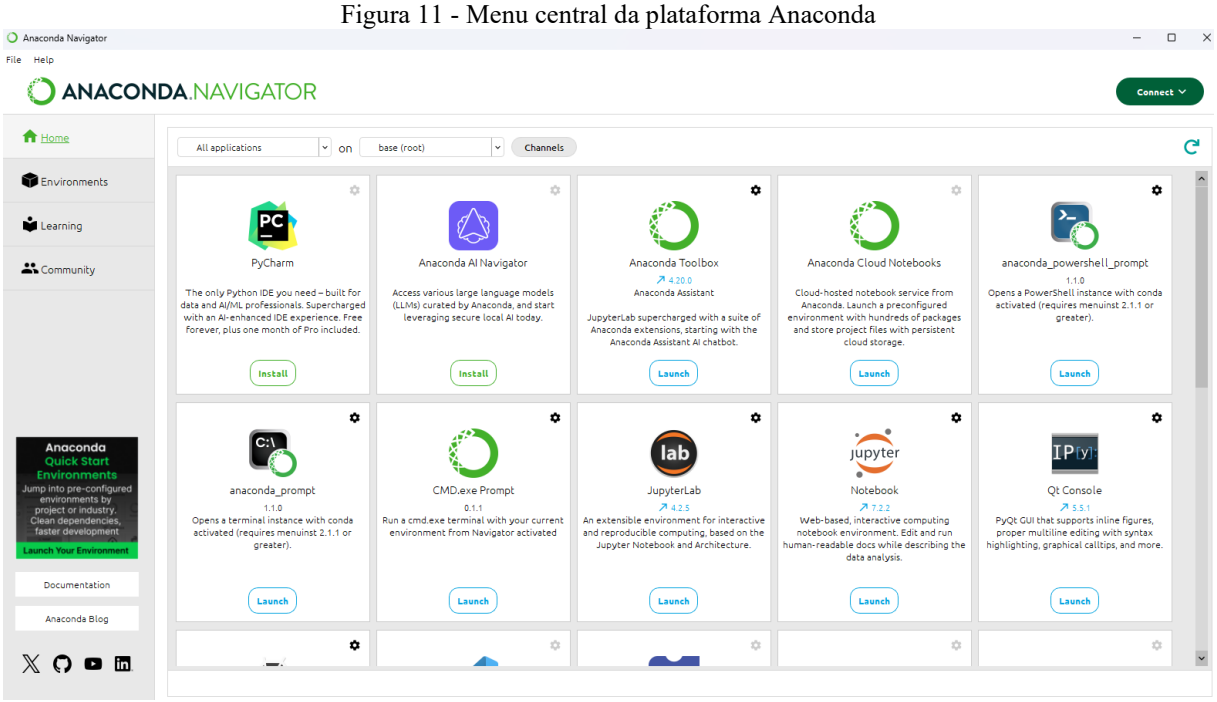
Apêndice 2: Instalação do modelo Py6S e recomendações para uso

Antes de utilizar a ferramenta, Wilson (2012b) apresenta algumas recomendações para facilitar o uso do Py6S, tornando a configuração do ambiente e a elaboração do código mais intuitivas.

Primeiro, é recomendada a instalação do gerenciador Conda (ANACONDA INC, 2025), uma ferramenta capaz de automatizar processos de instalação, atualização e remoção de pacotes, além de permitir a criação e o gerenciamento de ambientes virtuais isolados. Essa funcionalidade é especialmente útil para projetos que exigem diferentes versões de bibliotecas ou dependências (como é o caso do Py6S e algumas de suas extensões).

Optou-se pela instalação do gerenciador diretamente no site oficial da ferramenta, selecionando o pacote Anaconda em vez do Miniconda. Essa escolha se justifica porque o Anaconda já vem com pacotes científicos pré-instalados e oferece uma interface mais acessível para iniciantes, enquanto o Miniconda fornece apenas o mínimo necessário, indicado para usuários que desejam maior controle e leveza. É importante ressaltar que o conda pode ser adquirido gratuitamente por meio de um perfil de estudante.

Figura 11 - Menu central da plataforma Anaconda



Fonte: ANACONDA, 2025. Imagem capturada pelo autor.

Wilson (2012b) não cita esse ponto em sua explicação sobre o setup do Py6S. Entretanto, para aqueles que estão tendo o primeiro contato com programação ou possuem

pouca familiaridade na área, recomenda-se a instalação do aplicativo Visual Studio Code (VSCode). O VSCode é um editor de código-fonte que suporta as principais linguagens de programação e será utilizado como ambiente padrão de desenvolvimento e depuração de códigos para este trabalho.

Uma vez concluída a instalação dos itens essenciais, o primeiro passo é criar um ambiente em Python para conter o Py6S. Para isso, deve-se abrir o Anaconda Navigator, acessar o aplicativo “CMD.exe Prompt” e abrir o terminal programável. O comando a ser utilizado é o seguinte:

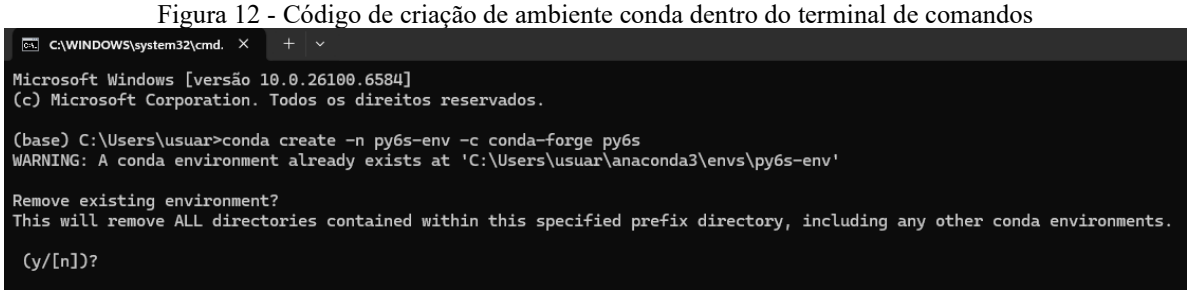
```
(III) $ conda create -n py6s-env -c conda-forge py6s
```

Esse comando criará um “ambiente conda” para o Py6S. Uma vez criado, será necessário ativar o ambiente Py6S, para isso basta executar o comando:

```
(IV)  activate py6s-env
```

Destaca-se também, que se a janela do terminal foi fechada, não ficará salvo os códigos/funções que foram inseridos ali, mas isso não quer dizer que o ambiente foi deletado. A partir da primeira vez que ele foi criado, para retomar o ambiente basta repetir o código `activate py6s-env`. Você também pode sobrepor o ambiente já criado reutilizando o código `conda create -n py6s-env -c conda-forge py6s`, o terminal te dará a opção para seguir com a substituição ou continuar usando o ambiente que já está definido.

Figura 12 - Código de criação de ambiente conda dentro do terminal de comandos



Fonte: acervo do autor, 2025.

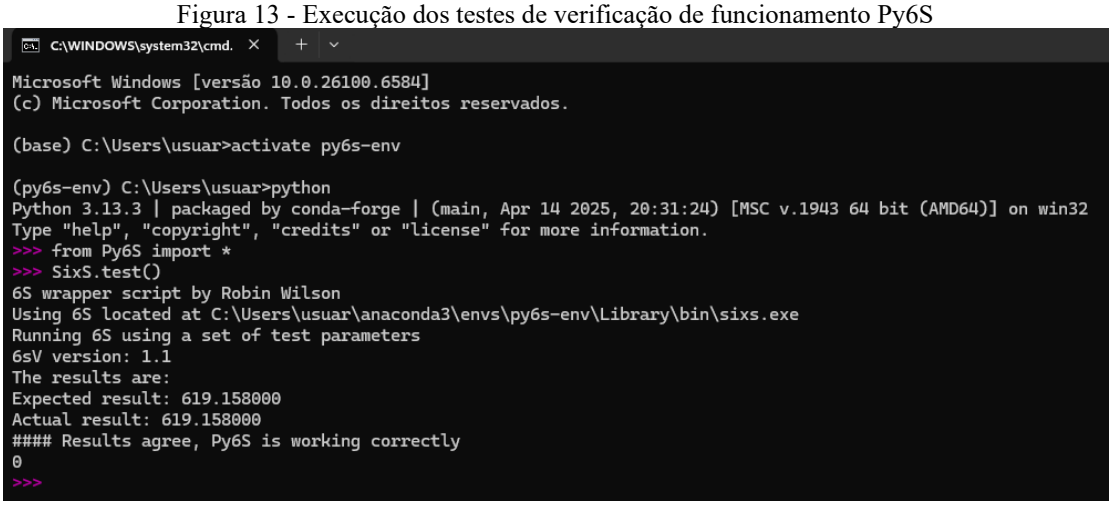
Outro input que se tornará recorrente é o de função pynthon. Depois que criado o ambiente Py6S, para executar qualquer função ou iniciar um bloco de códigos, é necessário que se digite `Python` no terminal cmd para ativar o ambiente Python e processar as funções.

Após a instalação e criação do ambiente, Wilson (2012) executa dois testes para verificar se a instalação ocorreu conforme o esperado o primeiro teste tem a finalidade de verificar se o código consegue localizar se o executável do 6S, em qual o Py6S se baseia, foi encontrado em <PATH_TO_SIXS_EXE>, utilizando as funções do bloco (I). Se este primeiro teste falhar, é necessário localizar o executável 6S manualmente. O segundo teste tem como objetivo testar se o Py6S foi instalado corretamente, para isso utiliza o bloco de código (II).

```
(V)    $ Python
       >>> from Py6S import *
       >>> SixS.test()

(VI)   $ Python
       >>> import os.path
       >>> import Py6S; print(os.path.dirname(Py6S.__file__))
       <PATH_TO_PY6S_MODULE>
       >>> exit()
       cd <PATH_TO_PY6S_MODULE>
       $ py.test
```

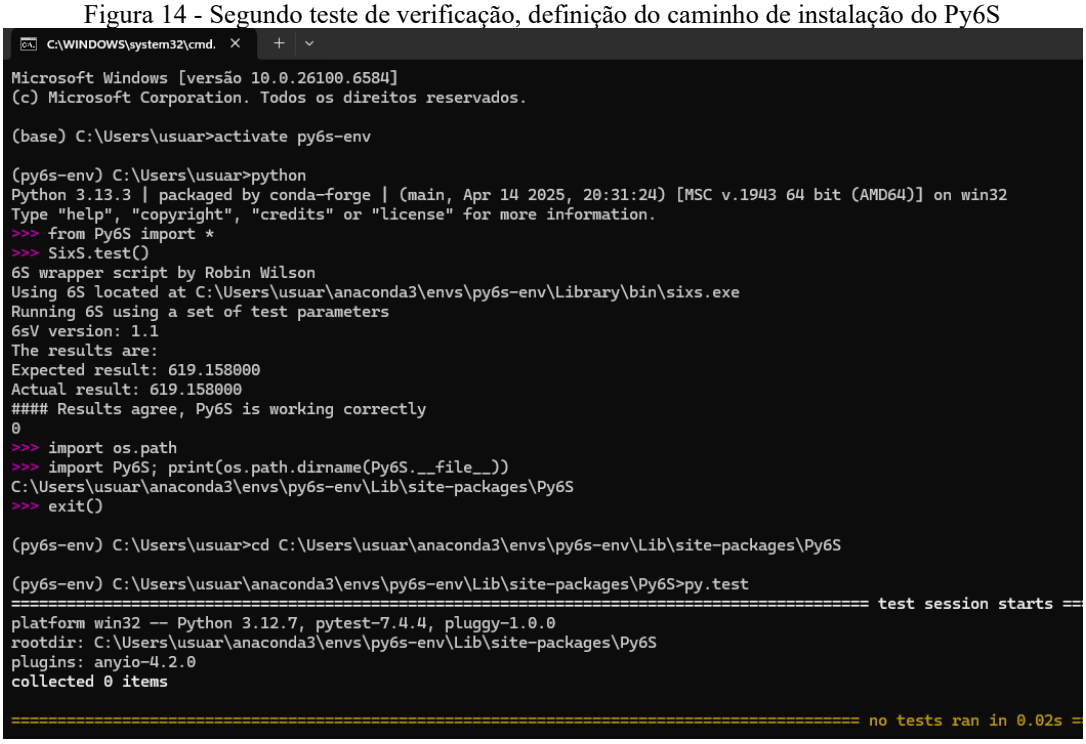
Figura 13 - Execução dos testes de verificação de funcionamento Py6S



Fonte: acervo do autor, 2025

No segundo input de código, é apresentado outro comando de terminal recorrente, o `cd`. Esse é o comando usado para alterar o diretório atual, ou seja, para navegar entre pastas. Ele será importante futuramente quando forem definidas as rotinas completas para cálculos de bandas.

Figura 14 - Segundo teste de verificação, definição do caminho de instalação do Py6S



Fonte: Acervo do autor, 2025.

O Py6S é estruturado a partir de um conjunto de classes em Python reunidas no módulo Py6S. A classe central é a SixS, responsável pela definição de parâmetros de entrada e pela execução do modelo.

Sempre que a classe SixS é utilizada – geralmente no início da execução do código – os parâmetros definidos pelo usuário são gravados em um arquivo temporário, que serve de entrada para o executável padrão do 6S.

A saída do 6S é gerada em formato de texto. O Py6S captura essa saída, realiza a análise sintática das informações e extrai os valores numéricos correspondentes a cada parâmetro, os quais ficam disponíveis para uso em análises e aplicações subsequentes.

Apêndice 3: Programação Py6S

```
from Py6S import *
# ============================
# CONFIGURAÇÕES GERAIS
# ============================
# Função para rodar a simulação para cada banda
def run_6s(banda, comprimento_onda):
    s = SixS()
    # ------------------------
    # Geometria da cena
    # ------------------------
    s.geometry = Geometry.User()
    s.geometry.solar_z = 19.168   # Ângulo zenital solar
    s.geometry.solar_a = 97.47    # Azimute solar
    s.geometry.view_z = 0         # Sensor nadir
    s.geometry.view_a = 0         # Azimute do sensor
    s.geometry.month = 12
    s.geometry.day = 16

    # ------------------------
    # Perfil Atmosférico
    # ------------------------
    s.atmos_profile = AtmosProfile.UserWaterAndOzone(3.344, 0.269)
    s.aero_profile = AeroProfile.PredefinedType(AeroProfile.Continental)
    s.aot550 = 0.145

    # ------------------------
    # Altitude
    # ------------------------
    s.altitudes.set_target_custom_altitude(0.66)  # Média da bounding box em
km
    s.altitudes.set_sensor_satellite_level()

    # ------------------------
    # Banda espectral
    # ------------------------
    s.wavelength = Wavelength(comprimento_onda)

    # ------------------------
    # Refletância do Solo
```

```
    # ------------------------
    s.ground_reflectance = GroundReflectance.HomogeneousLambertian(0.22)

    # ------------------------
    # Rodar simulação
    # ------------------------
    s.run()

    # ------------------------
    # Mostrar resultados
    # ------------------------
     print(f'==============================')
     print(f'Resultados para Banda {banda}')
     print(f'==============================')
     print(f'Path    Radiance:    {s.outputs.atmospheric_intrinsic_radiance}
     W/m²/sr/µm')
     print(f'Radiância no TOA: {s.outputs.apparent_radiance} W/m²/sr/µm')
     print(f'Transmitância        Direta        (Sun        →        Ground):
     {s.outputs.transmittance_total_scattering.downward}')
     print(f'Transmitância       Direta       (Ground       →       Sensor):
     {s.outputs.transmittance_total_scattering.upward}')
     print(f'Path                                                  Reflectance:
     {s.outputs.atmospheric_intrinsic_reflectance}')
     print(f'Apparent Reflectance (TOA): {s.outputs.apparent_reflectance}')
     print(f'Pixel Reflectance (Superfície): {s.outputs.pixel_reflectance}')
     print(f'Pixel    Radiance    (Superfície):    {s.outputs.pixel_radiance}
     W/m²/sr/µm')
     print('\n')
# ============================
# Executar para todas as bandas
# ============================
bandas = {
    'Blue': 0.475,
    'Green': 0.555,
    'Red': 0.66,
    'NIR': 0.83,
    'PAN': 0.63
}

for banda, comprimento in bandas.items():
    run_6s(banda, comprimento)
```