



Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia Aeroespacial

# **Viabilidade de um Segmento Espacial Dedicado ao Monitoramento da Floresta Amazônica**

Autor: Renan Santos Ferreira  
Orientador: (Prof. Dr. Giancarlo Santilli)

Brasília, DF  
10 de Dezembro de 2018





Renan Santos Ferreira

## **Viabilidade de um Segmento Espacial Dedicado ao Monitoramento da Floresta Amazônica**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Aeroespacial).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: (Prof. Dr. Giancarlo Santilli)

Brasília, DF

10 de Dezembro de 2018

---

Renan Santos Ferreira

Viabilidade de um Segmento Espacial Dedicado ao Monitoramento da Floresta Amazônica/ Renan Santos Ferreira. – Brasília, DF, 10 de Dezembro de 2018-  
85 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: (Prof. Dr. Giancarlo Santilli)

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 10 de Dezembro de 2018.

1. Amazônia. 2. Engenharia Aeroespacial. I. (Prof. Dr. Giancarlo Santilli).  
II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Viabilidade de um  
Segmento Espacial Dedicado ao Monitoramento da Floresta Amazônica

CDU 02:141:005.6

---

Renan Santos Ferreira

## **Viabilidade de um Segmento Espacial Dedicado ao Monitoramento da Floresta Amazônica**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Aeroespacial).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, :

---

**(Prof. Dr. Giancarlo Santilli)**  
Orientador

---

**(Prof. Dr. Leonardo Aguayo)**  
Convidado 1

---

**(Prof. Dr. William Reis Silva)**  
Convidado 2

Brasília, DF  
10 de Dezembro de 2018



*Em um buraco, to animal cai; o buraco, sem querer, todo animal desce; por não ver mais a luz do buraco, só o humano surta, pois o animal tenta somente em subir, mesmo sendo, o humano, pela razão somente o hábil de subir. Portanto, use menos aquilo que torna um animal e mais aquilo que te diferencia de um. Luciano Machado*



# Agradecimentos

Agradeço a Deus, primeiramente, por ter me acompanhado toda essa trajetória até chegar aqui, pois toda vitória que conquistei na vida, foi graças a ele. Agradeço a minha família, por estarem sempre acompanhando de perto minhas conquistas e sempre me dando suporte no que eu precisar. Agradeço de coração a minha mãe, que sempre acreditou em mim e me deu forças para nunca desistir. Agradeço ao meu pai, com seus ensinamentos de sempre buscar ser o melhor de mim todos os dias. Agradeço aos meus amigos da República 9 Caudas, Lucas Fidelis, Emanuel Belchior, Matheus Barcelos e os africanos, que me acompanharam nessa jornada universitária.

Agradeço a equipe Dragonfly, que me proporcionaram muitos momentos de alegria e dedicação à aviação. Ao Professor Dr. Giancarlo Santilli, que me deu a oportunidade de trabalhar em uma área que pouco conhecia, mas que tem grande importância nacional. As pessoas que me ajudaram diretamente, Francisco Lima, Samara Souza, Luciano Machado. Aos meus tios, João Batista Sá, Cristina Vieira. Agradeço a todos meus amigos de Brasília, que me acompanharam nessa longa jornada na faculdade UnB Gama.



# Resumo

As missões de sensoriamento remoto por satélite são essenciais para pesquisas de longo prazo em torno da condição dos recursos da terra e do meio ambiente. Historicamente, com o desenvolvimento e contínuo aprimoramento de tecnologias de geoprocessamento e sensoriamento remoto assim como a disponibilidade crescente de dados orbitais, o Brasil tornou-se uma referência no desenvolvimento e uso de sistemas de monitoramento do uso/cobertura da terra, particularmente para florestas. Em missões de sensoriamento remoto, há estreitas inter-relações entre requisitos diferentes, como altitude orbital, tempo de revisita, a vida da missão e resolução espacial. Neste trabalho apresenta a viabilidade de missão, com foco em monitoramento do desmatamento na amazônia, de dois satélites: Óptico e SAR. Será definido os parâmetros orbitais e da carga útil imageadora. Com auxílio do software STK com a ferramenta *Figure of Merit*, será analisado e discutido o número de acessos, tempo de cobertura e Qualidade de cobertura para cada satélite, na amazônia. Ambos os segmentos espaciais são satisfatórios para a missão, porém o Satélite SAR tem o melhor desempenho para missão, devido a maior quantidade de informações que podem ser adquiridas pelas imagens no micro-ondas além da capacidade de imagear mesmo em condições climáticas desfavoráveis, como nuvens e chuva.

**Palavras-chaves:** Amazônia Legal, Desmatamento, SAR, SSO, STK, Sensoriamento Remoto,



# Abstract

Remote sensing satellite missions are essential for long-term research around the condition of land resources and the environment. Historically, with the development and continuous enhancement of geoprocessing and remote sensing technologies as well as the increasing availability of orbital data, Brazil has become a reference in the development and use of land use / land cover monitoring systems, particularly for forests. In remote sensing missions, there are close interrelationships between different requirements such as orbital altitude, revisit time, mission life, and spatial resolution. This work presents the feasibility of a mission, focusing on monitoring deforestation in Amazonia, of two satellites: Optical and SAR. The orbital and payload parameters will be defined. With the help of the STK software with the Figure of Merit tool, the number of accesses, time of coverage and Quality of coverage for each satellite in the Amazon will be analyzed and discussed. Both spatial segments are satisfactory for the mission, but the SAR Satellite has the best performance for mission, due to the greater amount of information that can be acquired by the images in the microwave besides the ability to image even in unfavorable climatic conditions like clouds It is rain.

**Key-words:** Amazônia Legal, Deforestation, SAR, SSO, STK, Remote sensing



# Lista de ilustrações

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Processo de coleta de informação para observação da terra . . . . .  | 27 |
| Figura 2 – Direção de propagação da radiação eletromagnética na forma de uma onda, em função das oscilações ortogonais dos campos magnético (M) e elétrico (E). (MENESES, 2012) . . . . . | 28 |
| Figura 3 – Espectro eletromagnético . . . . .   | 30 |
| Figura 4 – Componentes radiométricos da trajetória da radiação eletromagnética, da fonte ao sensor. (MENESES, 2012) . . . . .   | 31 |
| Figura 5 – Curvas de resposta espectral para vegetação nos intervalos da luz azul ao infravermelho próximo (NIR). (CAMPBELL, 1944–) (Adaptado) . . . . .                                  | 32 |
| Figura 6 – Processo de aquisição de imagens em um sistema de observação da terra. (SANTOS, 2013) . . . . .  | 34 |
| Figura 7 – Sensoriamento remoto óptico (MAINI, 2010) . . . . .  | 35 |
| Figura 8 – Configuração esquemática do mecanismo de imageamento pixel a pixel de um sensor multiespectral de varredura mecânica. (MAINI, 2010) . . . . .                                  | 37 |
| Figura 9 – Configuração esquemática do mecanismo de imageamento de um sensor de varredura eletrônica, com todos os pixels de uma linha imageados simultaneamente. (MAINI, 2010) . . . . . | 38 |
| Figura 10 – Ilustração do conceito de IFOV . . . . .  | 41 |
| Figura 11 – Sensoriamento remoto ativo por micro-ondas (MAINI, 2010) . . . . .  | 46 |
| Figura 12 – Configuração básica de um sistema RADAR. (NOVO, 2001) . . . . .   | 46 |
| Figura 13 – Penetração do sensor SAR pelo comprimento de onda $\lambda$ . (FLORES-ANDERSON KELSEY HERNDON, 2019) . . . . .  | 49 |
| Figura 14 – Geometria de observação de SLAR. (FLORES-ANDERSON KELSEY HERNDON, 2019) . . . . .   | 52 |
| Figura 15 – Geometria das observações usadas para formar a abertura sintética para o alvo P na posição longitudinal em $x = 0$ . (FLORES-ANDERSON KELSEY HERNDON, 2019) . . . . .         | 54 |
| Figura 16 – Percepção de biomassa por diferentes comprimentos de onda. (DABROWSKA WANDA KOWALIK, 2009) . . . . .  | 55 |
| Figura 17 – Efeito esquemático da polarização de retro-espalhamento em comprimentos de onda longos e curtos, dispersos de troncos ' <i>trunk</i> ' e coroas ' <i>crown</i> ' . . . . .    | 56 |
| Figura 18 – Órbita Sol-Síncrona (MAINI, 2010) . . . . .   | 58 |
| Figura 19 – Satélite CBERS 4 (INPE, 2018) . . . . .   | 61 |
| Figura 20 – Satélite ALOS-2. (JAXA, 2019a) . . . . .  | 62 |
| Figura 21 – Modos de observação do PALSAR-2. (JAXA, 2019b) . . . . .  | 62 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 22 – Visualização das orbitas pelo STK. Da esquerda para direita, o satélite Óptico e o satélite SAR . . . . .                             | 66 |
| Figura 23 – Visualização dos sensores pelo STK. O sensor Óptico, na Figura superior e abaixo o sensor SAR, com os três <i>beam mode</i> . . . . . | 69 |
| Figura 24 – Área de cobertura - Amazônia Legal . . . . .  | 70 |
| Figura 25 – Porcentagem de cobertura no intervalos de dias do satélite Óptico . . . . .   | 71 |
| Figura 26 – Porcentagem de cobertura no intervalos de dias do satélite SAR . . . . .  | 72 |
| Figura 27 – Análise estática de número de acessos do satélite Óptico . . . . .  | 72 |
| Figura 28 – Análise estática de número de acessos do satélite SAR . . . . .   | 73 |
| Figura 29 – Análise estática de tempo de cobertura do satélite Óptico . . . . .   | 74 |
| Figura 30 – Análise estática de tempo de cobertura do satélite SAR . . . . .  | 74 |
| Figura 31 – Análise estática de amostra de solo do satélite Óptico . . . . .  | 75 |
| Figura 32 – Análise estática de amostra de solo do satélite SAR . . . . .   | 75 |
| Figura 33 – Amazônia-1 realizando testes estruturais. (ESPACIAIS, 2019) . . . . .   | 78 |
| Figura 34 – sensor WFI, embarcado no amazonia-1. (ESPACIAIS, 2019) . . . . .  | 79 |
| Figura 35 – Tandem-L: uma missão de radar altamente inovadora . . . . .   | 79 |
| Figura 36 – Características de cargas típicas. (LARSON, 1999) . . . . .   | 85 |

# Lista de tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Especificações do sensor SAR. SAR Handbook (2019) . . . . .     | 63 |
| Tabela 2 – Parâmetros orbitais do satélite óptico . . . . .                | 66 |
| Tabela 3 – Parâmetros orbitais do satélite SAR . . . . .                   | 66 |
| Tabela 4 – Parâmetros do sensor óptico . . . . .                           | 68 |
| Tabela 5 – modos de feixe para o sensor SAR . . . . .                      | 68 |
| Tabela 6 – Parâmetros do sensor SAR . . . . .                              | 69 |
| Tabela 7 – Comparação de número de acessos para cada satélite . . . . .    | 73 |
| Tabela 8 – Comparação do tempo de cobertura de cada satélite . . . . .     | 74 |
| Tabela 9 – Comparação da Qualidade de cobertura de cada satélite . . . . . | 76 |



# Lista de abreviaturas e siglas

|        |  |
|--------|--|
| ALOS   | <i>Advanced Land Observing Satellite</i>   |
| CBERS  | <i>China-Brazil Earth-Resources Satellite</i>  |
| CCD    | Dispositivos de Cargas Acopladas   |
| DETER  | Detecção do Desmatamento na Amazônia Legal em Tempo Real                                       |
| DN     | <i>Digital Numbers</i>   |
| IFOV   | Campo de visada instantâneo  |
| FOV    | Campo de visada  |
| IR     | Infravermelho  |
| IRS    | Scanner multiespectral infravermelho   |
| LEO    | Baixa Órbita terrestre   |
| MMA    | Ministério do Meio Ambiente  |
| MUX    | Câmera multiespectral  |
| NDVI   | <i>Normalize Difference Vegetation Index</i>   |
| NIR    | Infravermelho próximo [PAN] Pancromática   |
| PALSAR | <i>Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar</i>  |
| PPCDAm | Plano de Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal do Ministério do Meio Ambiente |
| PPI    | <i>plan-position indicator</i>   |
| PRODES | Projeto de Estimativa do Desflorestamento da Amazônia/Inpe                                     |
| RAAN   | <i>Right ascension of the ascending node</i>   |
| RADAR  | <i>Radio Detection And Ranging</i>   |
| REM    | Radiação Eletromagnética   |
| RED    | Luz vermelha   |
| RT     | Tempo de revisita  |

|      |                                    |
|------|------------------------------------|
| SAR  | Radar de abertura Sintética        |
| SBR  | Radar Baseado no Espaço            |
| SLAR | <i>Side-Looking Airborne Radar</i> |
| SSO  | Órbita Sol-sincróna                |
| STK  | <i>Satellite Tool Kit</i>          |
| SWIR | Infra-vermelho de onda média       |
| VIS  | Luz visível                        |
| WFI  | Câmera de Campo Largo              |

# Sumário

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b>   | <b>23</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Justificativa</b>  | <b>24</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Objetivos</b>  | <b>24</b> |
| 1.2.1      | Objetivo Geral  | 24        |
| 1.2.2      | Objetivos específicos   | 24        |
| <b>1.3</b> | <b>Organização do Trabalho</b>  | <b>24</b> |
| <b>2</b>   | <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>  | <b>25</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Amazônia legal</b>   | <b>25</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm)</b> | <b>26</b> |
| <b>2.3</b> | <b>Sensoriamento Remoto</b>   | <b>26</b> |
| <b>2.4</b> | <b>Natureza da Radiação Eletromagnética</b>   | <b>27</b> |
| 2.4.1      | Modelo ondulatório  | 28        |
| 2.4.2      | Modelo corpuscular  | 29        |
| <b>2.5</b> | <b>Espectro Eletromagnético</b>   | <b>29</b> |
| 2.5.1      | Reflectância e Radiância  | 30        |
| 2.5.2      | Caracterização de reflexão e espectro da vegetação  | 32        |
| <b>2.6</b> | <b>Classificação de sistemas de sensoriamento remoto por satélite</b>                     | <b>33</b> |
| 2.6.1      | Sistemas de sensoriamento remoto óptico   | 34        |
| 2.6.1.1    | Parâmetros do sensor  | 34        |
| 2.6.2      | Mecanismos de imageamento multiespectral  | 36        |
| 2.6.2.1    | Sensores de Varredura Mecânica (Whiskbroom)   | 36        |
| 2.6.2.2    | Sensores de Varredura Eletrônica (Pushbroom)  | 37        |
| 2.6.3      | Resolução   | 39        |
| 2.6.3.1    | Resolução Espacial  | 39        |
| 2.6.3.2    | Resolução espectral   | 40        |
| 2.6.3.3    | Resolução Radiométrica  | 41        |
| 2.6.3.4    | Resolução temporal  | 42        |
| 2.6.4      | Processo de design de carga útil de observação  | 43        |
| <b>2.7</b> | <b>Sensores de imageamento RADAR</b>  | <b>45</b> |
| 2.7.1      | Conceitos Básicos   | 45        |
| 2.7.2      | Interações entre a radiação de micro-ondas e a superfície terrestre                       | 47        |
| 2.7.2.1    | Principais Variáveis  | 47        |
| 2.7.3      | Tipos de Sistemas RADAR   | 51        |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 2.7.4      | <i>Radar de Abertura Real - RAR</i> . . . . .                        | 51        |
| 2.7.5      | <i>Syntetic Aperture Radar - SAR</i> . . . . .                       | 53        |
| 2.7.6      | SAR para Mapeamento de Desmatamento e Degradação Florestal . . . . . | 54        |
| 2.7.7      | Características do SAR para mapeamento florestal . . . . .           | 55        |
| 2.7.7.1    | Resumo: Desmatamento do ponto de vista do SAR . . . . .              | 57        |
| 2.7.8      | Uso da terra e cobertura vegetal . . . . .                           | 57        |
| 2.7.9      | Órbita Sol-Síncrona . . . . .  | 57        |
| 2.7.9.1    | As Perturbações Orbitais em SSO . . . . .                            | 58        |
| 2.7.10     | Figura de Mérito . . . . .   | 59        |
| <b>2.8</b> | <b>Missões espaciais</b> . . . . .                                   | <b>60</b> |
| 2.8.1      | CBERS-4 . . . . .  | 60        |
| 2.8.2      | ALOS-2/PALSAR-2 . . . . .  | 61        |
| <b>3</b>   | <b>METODOLOGIA</b> . . . . .   | <b>65</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Parâmetros Orbitais</b> . . . . .                                 | <b>65</b> |
| 3.1.1      | Parâmetros orbitais do satélite Óptico . . . . .                     | 65        |
| 3.1.2      | Parâmetros orbitais do satélite SAR . . . . .                        | 65        |
| <b>3.2</b> | <b>Parâmetros do Sensor de Observação</b> . . . . .                  | <b>66</b> |
| 3.2.1      | Design do sensor Óptico . . . . .                                    | 67        |
| 3.2.1.1    | Bandas de operação . . . . .   | 67        |
| 3.2.1.2    | Parâmetros de resolução espacial . . . . .                           | 67        |
| 3.2.2      | Design do sensor SAR . . . . .                                       | 68        |
| 3.2.2.1    | Características do SAR . . . . .                                     | 68        |
| <b>3.3</b> | <b>Definindo área de cobertura - Amazônia Legal</b> . . . . .        | <b>69</b> |
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> . . . . .                              | <b>71</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Porcentagem de cobertura</b> . . . . .                            | <b>71</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Número de Acessos</b> . . . . .                                   | <b>72</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Tempo de Cobertura</b> . . . . .                                  | <b>73</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Qualidade de Cobertura</b> . . . . .                              | <b>75</b> |
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSÃO</b> . . . . .   | <b>77</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Missões futuras</b> . . . . .                                     | <b>77</b> |
| 5.1.1      | Amazonia-1 . . . . .   | 77        |
| 5.1.2      | Tandem-L . . . . .   | 78        |
|            | <b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .   | <b>81</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>APÊNDICES</b>                                | <b>83</b> |
| <b>APÊNDICE A – PRIMEIRO APÊNDICE . . . . .</b> | <b>85</b> |



# 1 Introdução

Segundo o Plano de Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal do Ministério do Meio Ambiente (PPCDAm), estabelecido em 2004, tem como desafio a redução de emissões provenientes de desmatamento deve ser avaliado em suas perspectivas espaciais e temporais (MMA, 2018). Historicamente, com o desenvolvimento e contínuo aprimoramento de tecnologias de geoprocessamento e sensoriamento remoto assim como a disponibilidade crescente de dados orbitais, o Brasil tornou-se uma referência no desenvolvimento e uso de sistemas de monitoramento do uso/cobertura da terra, particularmente para florestas (BRASIL, 2016).

O conhecimento sobre a dinâmica do uso e cobertura da terra tem sido elemento chave para o desenvolvimento de políticas de controle e prevenção do desmatamento na Amazônia, responsáveis pela redução de aproximadamente 80 da taxa anual do desmatamento (corte raso) na Amazônia Legal entre 2004 e 2015 (Programa PRODES/INPE) (MMA, 2018). O que de fato o acompanhamento espacial é de grande importância para preservação da Amazônia.

O presente trabalho visa a viabilidade de dois segmento espaciais para monitoramento do desmatamento na amazônia. Os monitoramentos contínuos serão realizados com o uso de imagens orbitais de alta/média resolução temporal (1 a 10 dias) por cada satélite. Para tal condição, serão apresentados a configuração de dois satélites idealizados, Óptico e SAR, destinados somente para o monitoramento da amazônia. Calculados parâmetros orbitais e parâmetros dos sensores, será utilizado o software de simulação *Satellite Tool Kit* (STK), desenvolvido pela *Analytical Graphics, Incorporated* para este trabalho de conclusão de curso uma análise de viabilidade dos dois satélites, verificando Número de Acessos, qualidade da cobertura e Tempo de cobertura.

Atualmente, para a Amazônia, há cinco sistemas de monitoramento por satélite em operação: PRODES, DETER, DEGRAD/DETEX, TerraClass e Queimadas. Em adição, as estimativas de emissões de gases de efeito estufa para Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas (LULUCF – do inglês Land Use, Land-use Change and Forestry) parte integrante do Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa e da Comunicação Nacional do Brasil junto à UNFCCC, coordenado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) (BRASIL, 2016).

## 1.1 Justificativa

O presente trabalho visa atingir duas missões ideais para monitoramento da amazônia que atenda essa demanda do crescente desmatamento. Um sistema eficiente de monitoramento é fundamental para o controle, manejo e fiscalização dos recursos naturais da região. Apesar dos diversos satélites de sensoriamento remoto disponíveis no Brasil (CBERS, Landsat, Spot) não se dispõe ainda de um sistema com alta frequência de observação.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Objetivo geral deste trabalho de conclusão do curso é uma análise de viabilidade de um segmento espacial dedicado ao monitoramento da amazônia em dois tipos de configurações: Óptico e SAR. Além desse objetivo principal, existem ainda outros objetivos secundários que precisam ser atingidos. São eles:

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Definir os parâmetros orbitais de cada satélite
- Definir a região de cobertura da amazônia
- Calcular os parâmetros dos sensores de cada satélite (Óptico e SAR)
- Especificar as configurações de cada sensor
- Realizar as análises de cobertura pela ferramenta *Figure of Merit* pelo STK
- Comparar o monitoramento de cada segmento espacial

## 1.3 Organização do Trabalho

No Capítulo 2, encontra-se o embasamento teórico necessário para a compreensão dos conceitos e equações utilizadas ao longo do trabalho. O Capítulo 3 apresenta a metodologia, uma definição preliminar de cada segmento. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos numericamente, além de apresentar as discussões e as comparações entre os dois satélites. Por fim, o Capítulo 5 é feita uma conclusão de tudo que foi apresentado anteriormente.

## 2 Referencial Teórico

Este capítulo destina-se a apresentar o referencial teórico que apoia a metodologia deste trabalho. Os principais temas tratados são: Amazônia Legal 2.1, Sensoriamento remoto 2.3, Processo de design de payload de observação 2.6.4, *Syntetic Aperture Radar* - SAR 2.7.5 e Características do SAR para mapeamento florestal 2.7.7.

### 2.1 Amazônia legal

Com uma extensão total de aproximadamente 5.020,000  $km^2$ , a amazônia legal, foi criada inicialmente como área de atuação da superintendência do plano de valorização Econômica da Amazônia (SPVEA), em 1953 (IBGE, 2018). Atualmente, ela corresponde à área dos Estados da Região Norte (Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins), acrescidos de totalidade do Estado do Mato Grosso e dos municípios do Estado do Maranhão situados a oeste do meridiano 44° O.

A Amazônia é o maior bioma do Brasil: num território de 4.196,943 milhões de  $km^2$  (IBGE, 2018), crescem 2.500 espécies de árvores (ou um-terço de toda a madeira tropical do mundo) e 30 mil espécies de plantas (das 100 mil da América do Sul) (AB'SABER, 1998). As estimativas situam a região como a maior reserva de madeira tropical do mundo. Seus recursos naturais – que, além da madeira, incluem enormes estoques de borracha, castanha, peixe e minérios, por exemplo – representam uma abundante fonte de riqueza natural (AB'SABER, 1998).

Na última década, a Amazônia tem sido foco de atenção mundial devido à sua riqueza mineral, à sua grande biodiversidade de espécies florestais e também pelos efeitos que o desmatamento em grande escala pode provocar no clima regional e global (BRASIL, 2016).

Um dos problemas encontrados para sensoriamento está no seu alto índice de pluviosidade. A região amazônica é uma das áreas mais chuvosas do Planeta. Essa característica resulta da conjugação de fatores como sua favorável posição latitudinal, ao redor da linha do equador, onde incide abundante radiação solar, e, sobretudo, de aspectos relativos à circulação geral atmosférica e à dinâmica dos sistemas atmosféricos que atuam nesta área do continente sul-americano (FRANCA, 2015).

No que se refere às chuvas, por exemplo, apesar de sua deficiente rede de estações meteorológicas, sabe-se que a região apresenta significativa variação espacial e temporal na distribuição de seus volumes e regimes pluviais. Os três principais núcleos chuvosos da Amazônia estão localizados: 1) no noroeste do estado do Amazonas, com volumes acima

de 3000 mm/ano; 2) na parte central da Amazônia, em torno da latitude 5° sul, onde são registrados volumes superiores aos 2500 mm/ano; 3) entre o litoral do Amapá e a foz do rio Amazonas no estado do Pará, com pluviosidade acima dos 4000 mm/ano (FRANCA, 2015).

## 2.2 Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm)

Segundo MMA (2018), desde 2004, houve importantes avanços no combate ao desmatamento no País. O maior resultado desse esforço foi, sem dúvida, a redução da taxa do patamar de 20.000  $km^2$  para os atuais 6.400  $km^2$ , considerando a média dos três últimos anos entre 2014 e 2016. Em relação à média de referência da Política Nacional de Mudança do Clima, igual a 19.625  $km^2$  (período 1996-2005), o desmatamento foi reduzido em 59,3%, considerando a medição de 7.893  $km^2$  referente à taxa consolidada de 2016.

Após mais de dez anos de implementação do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm) e seis anos do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado (PPCerrado) surgiram novos desafios que demandaram e continuam demandando constante inovação. A execução de políticas públicas ambientais, em especial o combate ao desmatamento, é altamente dependente da atuação coordenada de diversos atores – não somente governamentais –, o que torna o combate ao desmatamento e a promoção do uso sustentável da floresta uma tarefa complexa e de longo prazo (MMA, 2018).

Para o Brasil (2016), conhecer a dinâmica no território e os fatores que alteram sua distribuição é fundamental para planejar as ações para prevenção e combate. E é nesse sentido que o PPCDAm busca atuar: nas áreas críticas de ocorrência de desmatamento observadas nos últimos anos.

## 2.3 Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto é a prática de obter informações sobre as superfícies terrestres e aquáticas da Terra usando imagens obtidas de uma perspectiva aérea, usando radiação eletromagnética em uma ou mais regiões do espectro eletromagnético, refletidas ou emitidas da superfície da Terra. (CAMPBELL, 1944–)

Uma das vantagens potenciais que essa tecnologia oferece é que, através dela, podem ser feitas várias observações, medições e imagens de fenômenos produzidos que estão além dos limites da percepção normal (MAINI, 2010).

As aplicações incluem o monitoramento de recursos naturais e agrícolas, a avaliação

do estoque de culturas e produção, localização de incêndios florestais e avaliação dos danos causados, mapeamento e monitoramento da vegetação, qualidade do ar e da água, etc.

O processo de coleta de informação para observação da terra é regido pela interação entre a radiação eletromagnética (REM) e o alvo. De acordo com Souza (2010), para gerar informação relevante, o processo é composto por sete elementos fundamentais e é apresentado na Figura 1:

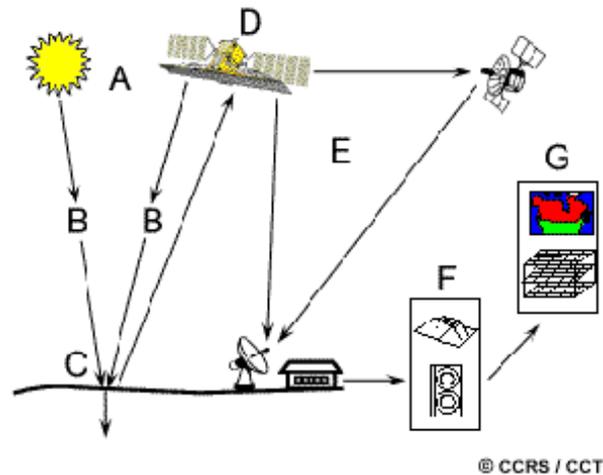


Figura 1 – Processo de coleta de informação para observação da terra

- (A) Fonte de energia ou iluminação
- (B) Radiação eletromagnética e atmosfera
- (C) Interação com o alvo
- (D) Registro da energia pelo sensor
- (E) Transmissão, recepção e processamento dos dados
- (F) Interpretação e análise
- (G) Aplicações

## 2.4 Natureza da Radiação Eletromagnética

O entendimento começa com a dualidade do comportamento da radiação eletromagnética (REM): onda e energia. Isso significa que dizer que a REM que se propaga pelo espaço vazio, como a luz solar, é, ao mesmo tempo, uma forma de onda e uma forma de energia. A importância da dualidade para o sensoriamento tem grande relevância, pois a coexistência da radiação na forma de onda e na forma de energia deve ser considerada

para que se possa explicar tudo o que se observa nas imagens com referência às características dos objetos. Os modelos para denominação do comportamento da dualidade é formulada por ondulatório (onda) e corpuscular (energia). (MENESES, 2012)

A principal fonte de energia para o sensoriamento remoto é a radiação eletromagnética (REM). A REM não precisa de um meio material para se propagar e estabelece a ligação entre a fonte de energia, os alvos e o sensor. As principais fontes naturais de energia utilizadas pelo sensoriamento remoto são originadas pelo Sol e pela Terra. (NOVO, 2001)

### 2.4.1 Modelo ondulatório

Para o modelo ondulatório, a REM pode ser explicada como uma forma de onda senoidal e harmônica. De acordo com as formulações de Maxwell, uma partícula carregada eletricamente gera um campo elétrico em torno de si e o movimento dessa partícula gera, por sua vez, um campo magnético. Quando essa partícula é acelerada, as perturbações entre os dois campos se propagam repetitivamente no vácuo em uma direção ortogonal à direção dos campos elétricos e magnéticos, como é mostrado na Figura 2. Essas perturbações dos campos elétrico (E) e magnético (M) são chamadas de ondas eletromagnéticas. (MENESES, 2012)

Com sua propagação na velocidade da luz (300.000 km por segundo), a REM é medida

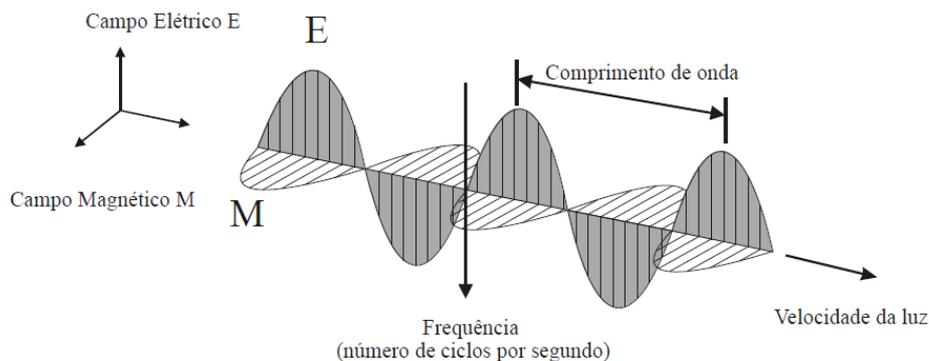


Figura 2 – Direção de propagação da radiação eletromagnética na forma de uma onda, em função das oscilações ortogonais dos campos magnético (M) e elétrico (E). (MENESES, 2012)

em frequência (em unidades de Hertz- Hz) e comprimento de onda  $\lambda$  (em unidade de metro). Da física clássica a seguinte relação entre o comprimento de onda  $\lambda$  e a frequência exprime a lei do comportamento ondulatório:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}. \quad (2.1)$$

Seguindo o mesmo autor, para [Meneses \(2012\)](#) a interação do modelo ondulatório é de natureza macroscópica. O que na prática, nas imagens de sensoriamento remoto a interação macroscópica é a resposta da intensidade com que um objeto reflete a radiação eletromagnética em razão do comprimento de onda e a textura da superfície do objeto. Em sensoriamento remoto, as texturas das superfícies dos objetos vistas nas imagens podem ser classificadas em dois tipos: especulares e difusoras.

- reflectância especular: uma superfície lisa com o raio incidente refletido no sentido oposto com o mesmo ângulo.
- reflectância difusora: reflectância difusora de uma superfície rugosa com os raios refletidos espalhados em todas as direções

Para o sensoriamento remoto, o modelo ondulatório se aplica melhor para os grandes comprimentos de onda das micro-ondas das imagens de radar, que são obtidas com maiores que 3,0 cm.

### 2.4.2 Modelo corpuscular

As formulações baseadas no modelo ondulatório da radiação eletromagnética falham ao tentar explicar fenômenos importantes que ocorrem quando a radiação eletromagnética interage com a matéria.

Para algumas atividades, porém, a REM é mais convenientemente modelada utilizando o “ Modelo Corpuscular”, que considera que a energia é transportada na forma de pequenos pacotes de energia denominados fótons ou quanta (plural de quantum). A quantidade de energia liberada por um fóton ( $Q$ ), em um determinado comprimento de onda ( $\lambda$ ) é dado pela Equação 2.2.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.2)$$

onde,  $E$  = energia

$h$  = constante de planck ( $6,624 \times 10^{-34}$  Joules.seg)

$c$  = velocidade da luz ( $c = 299.292,46$  km/s ou aproximadamente 300.000 km/s)

$\lambda$  = comprimento de onda

## 2.5 Espectro Eletromagnético

O espectro eletromagnético representa a distribuição da radiação eletromagnética por regiões, segundo o comprimento de onda e a frequência. Como apresentado na Figura

3, o espectro eletromagnético abrange desde curtos comprimentos de ondas, no caso os raios cósmicos e raios gama ( $\gamma$ ), de alta frequência, até longos comprimentos de onda as ondas de rádio e de TV, de baixa frequência. na região do espectro visível (VIS), o olho humano enxerga a energia (luz) eletromagnética, capaz de distinguir as cores do violeta ao vermelho. A radiação infravermelho IR, é subdividida em três regiões: infravermelho próximo (0,7 - 1,3  $\mu\text{m}$ ), medio (1,3 - 6,0  $\mu\text{m}$ ) e distante ou termal (6,0 - 1000  $\mu\text{m}$ ). (FLORENZANO, 2002)

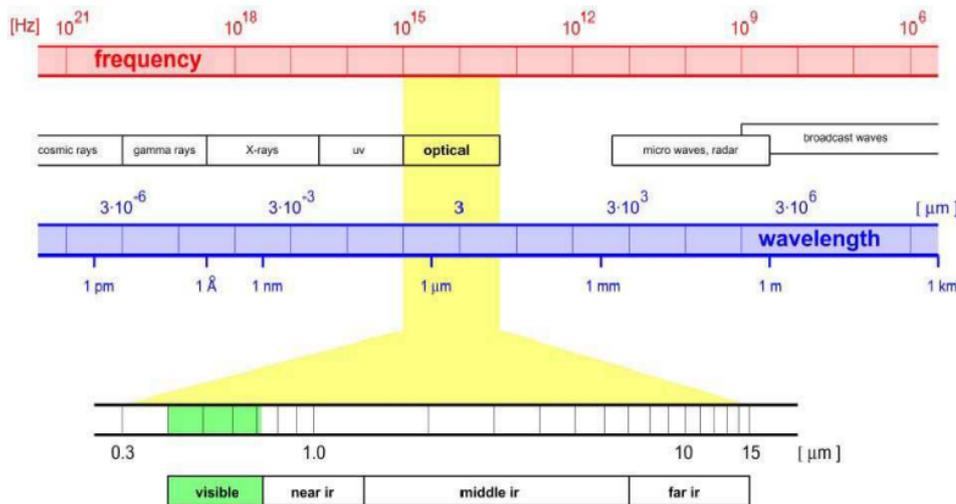


Figura 3 – Espectro eletromagnético

A faixa espectral mais utilizada em sensoriamento remoto estende-se de 0,3  $\mu\text{m}$  a 15  $\mu\text{m}$ , embora a faixa das micro-ondas também seja utilizada. Esta faixa é denominada de espectro ótico, porque a radiação pode ser coletada por sistemas óticos. Esta faixa inclui os espectros do ultravioleta, do visível e do infravermelho, como apresentado na Figura 3.

### 2.5.1 Reflectância e Radiância

A determinação da natureza dos alvos pelos métodos de sensoriamento remoto é baseada no fato de que diferentes materiais são caracterizados por reflectâncias próprias em cada banda do espectro. A reflectância, ou fator de reflexão, é proporcional à razão da radiação refletida (*Radiância*) pela radiação incidente (*Irradiância*). Quando as respostas espectrais de vários materiais são conhecidas, as propriedades de alvos desconhecidos podem ser determinadas pela comparação das respostas espectrais desses alvos com os dados de referência. (SULSOFT, 2004)

Segundo o autor Campbell (1944-), a *Radiância* representa o brilho da radiação refletida da superfície da Terra, que é medido como o brilho (watts) por intervalo de comprimento de onda (micrômetro) por um ângulo sólido (Esterradianos - str) por metro quadrado a partir do qual foi refletido. Assim, o brilho medido é definido em relação ao

comprimento de onda (isto é, “cor”), área espacial (ângulo), intensidade (brilho) e área. Sendo assim, a imagem formada no sensor é uma imagem da radiância. Os valores de radiância são convertidos em DN (Digital Number), gerando a imagem digital.

Para este presente trabalho, as definições que serão vistas são somente as mais importantes para entender o significado dos componentes de um modelo básico de sensoriamento remoto apresentados pela [Meneses \(2012\)](#), como ilustrado na Figura 4. Os números que identificam na Figura 4, cada um dos componentes desse modelo representam os termos radiométricos que são definidos a seguir, em uma ordem sequencial segundo a trajetória da REM da fonte (1) até o sensor.

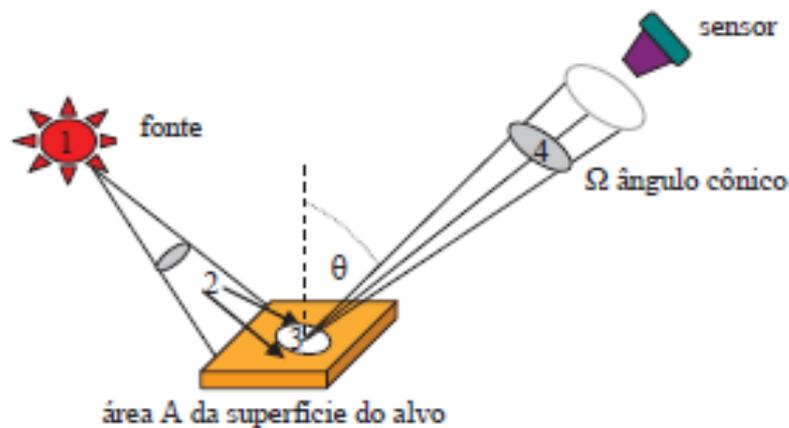


Figura 4 – Componentes radiométricos da trajetória da radiação eletromagnética, da fonte ao sensor. ([MENESES, 2012](#))

1. *Energia radiante*  $Q$  é a energia que se propaga da fonte na forma de ondas eletromagnéticas, medida em Joule (J).
2. *Fluxo radiante* é a taxa na qual a energia radiante é transferida de um ponto ou superfície para outra superfície, medida em watts (W). O fluxo é medido por um período de tempo. Também é a taxa de tempo que o fluxo ilumina a superfície do terreno, que será imageada pelo sensor.

$$\Phi = \delta Q / \delta t \quad (2.3)$$

3. *Irradiância* é o fluxo radiante solar incidente na superfície do terreno por área de superfície, medido em watts por metro quadrado ( $W/m^2$ ). Em termos de unidade a irradiância é medida em ( $W/m^2 \mu m$ ) quando se integra às variáveis da atmosfera pela qual a radiação passa.

$$E_\lambda = \Phi / \Delta A \quad (2.4)$$

4. *Radiância* é a medida feita pelo sensor da densidade de fluxo radiante que deixa um elemento de área da superfície do terreno, que se propaga em uma direção definida por um cone elementar de um ângulo sólido ( $\Omega$ ) contendo aquela direção, com a posição do sensor medida pelo co-seno do ângulo em relação à normal superfície do terreno ( $\theta$ ). Em termos de unidade a radiância é medida em  $W/m^2 \text{str}\mu m$ .

$$L_\lambda = \Phi / \Delta\Omega \Delta A \cos \theta \quad (2.5)$$

### 2.5.2 Caracterização de reflexão e espectro da vegetação

A reflectância da radiação solar pela copa da vegetação envolve as reflectâncias conjunturais de vários fatores, incluindo estrutura da planta, estágio de crescimento, propriedades físicas e químicas de solos na superfície e condições atmosféricas. (LIU., 2006)

A determinação e a diferenciação da vegetação pelos métodos de sensoriamento remoto é possível no intervalo de 0,4 até 2,5  $\mu m$ , pois neste intervalo as folhas são caracterizadas por comportamentos específicos de reflexão, absorção e transmissão. (SULSOFT, 2004)

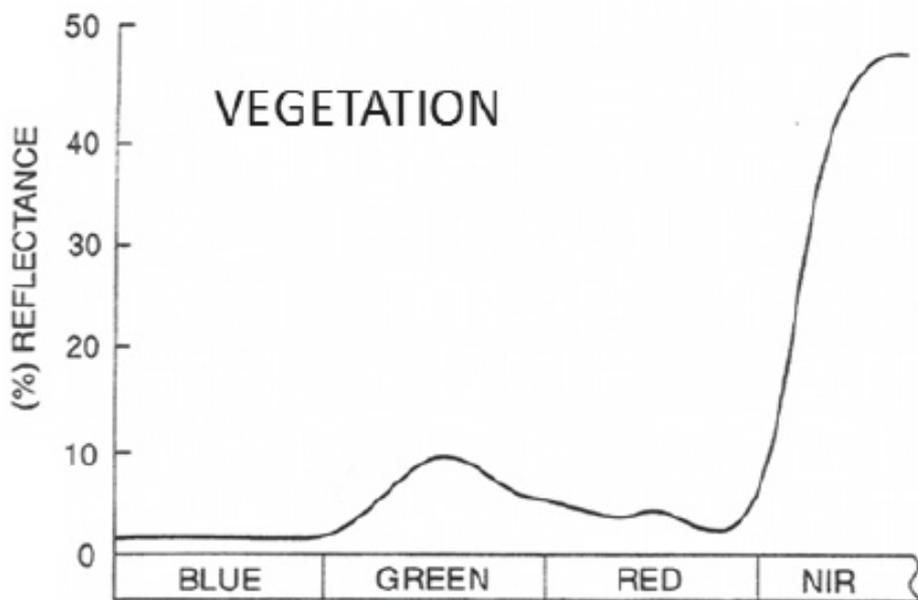


Figura 5 – Curvas de resposta espectral para vegetação nos intervalos da luz azul ao infravermelho próximo (NIR). (CAMPBELL, 1944–) (Adaptado)

No VIS, o comportamento da reflexão é determinado pela clorofila, cuja absorção encontra-se no intervalo da luz azul (0,4 - 0,5  $\mu m$ ) e da luz vermelha (0,6 - 0,7  $\mu m$ ); enquanto reflete no intervalo da luz verde (0,5 - 0,6  $\mu m$ ). A radiação incidente atravessa, quase sem perda, a cutícula e a epiderme, onde as radiações correspondentes ao vermelho

e ao azul são absorvidas pelos pigmentos do mesófilo, assim como pelos carotenoides, xantofilas, e antocianidinas, que causam uma reflexão característica baixa nos comprimentos de onda supracitados. As clorofilas A e B regulam o comportamento espectral da vegetação e o fazem de maneira mais significativa em comparação com outros pigmentos. A clorofila absorve a luz verde só em pequena quantidade, por isso a reflectância é maior no intervalo da luz verde, o que é responsável pela cor verde das folhas para a visão humana. (SULSOFT, 2004)

As reflectâncias médias da água e da vegetação são muito próximas na região do visível dificultando as suas discriminação nas fotos aéreas do visível, enquanto facilmente são discriminadas na imagem do infravermelho próximo de um sensor multi espectral. (MENESES, 2012)

No NIR (0,7 - 1,3  $\mu\text{m}$ ), dependendo do tipo de planta, a radiação é refletida em uma proporção de 30 a 70% dos raios incidentes, ainda que as superfícies das folhas e os pigmentos sejam transparentes para esses comprimentos de onda. (SULSOFT, 2004)

## 2.6 Classificação de sistemas de sensoriamento remoto por satélite

Para o autor Maini (2010) os sistemas de sensoriamento remoto podem ser classificados com base na fonte de radiação e nas regiões espectrais usadas para aquisição de dados.

Como mencionado anteriormente, o sensoriamento remoto por satélite é a ciência de adquirir informações sobre a superfície da Terra ao detectar e registrar a energia refletida ou emitida pela superfície da Terra com a ajuda de sensores a bordo do satélite.

Com base na fonte de radiação, o autor Maini (2010) em seu livro classifica como:

1. Sistemas de sensoriamento remoto **passivo**
2. Sistemas de sensoriamento remoto **ativo**

Em seu livro, o autor Maini (2010) define os sistemas de sensoriamento remoto passivo que detectam a radiação solar refletida pelos objetos na superfície da Terra ou detectam a radiação térmica ou micro-ondas emitida pelos mesmos. Sistemas ativos de sensoriamento remoto fazem uso de fontes artificiais ativas de radiação geralmente montadas na plataforma de sensoriamento remoto.

Dependendo das regiões espectrais usadas para aquisição de dados, elas podem ser classificadas como:

1. Sistemas de sensoriamento remoto óptico (incluindo visível, perto de IR e sistemas IR de ondas curtas)

2. Sistemas de sensoriamento remoto por infravermelhos térmicos
3. Sistemas de sensoriamento remoto por micro-ondas

O autor Santos (2013), apresenta uma configuração típica de um sistema de sensoriamento remoto na Figura 6.

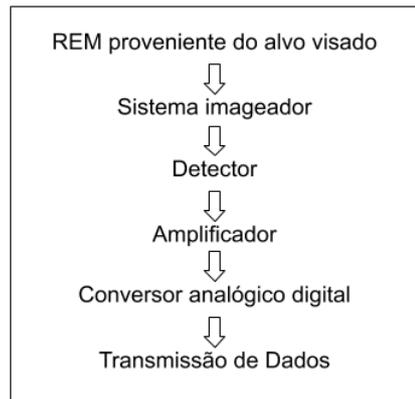


Figura 6 – Processo de aquisição de imagens em um sistema de observação da terra. (SANTOS, 2013)

### 2.6.1 Sistemas de sensoriamento remoto óptico

Define-se sensores imageadores multiespectrais os instrumentos eletro-óptico capazes de obter múltiplas imagens simultâneas da superfície terrestre, desde o comprimento de onda da luz visível azul, até a região termal. Os sensores ópticos e termal operam, praticamente, da mesma forma. ((MENESES, 2012)

Para Maini (2010) os sistemas ópticos de sensoriamento remoto que empregam energia solar estão na categoria de sistemas de sensoriamento remoto passivo. Segundo o mesmo autor, os sistemas de sensores remotos ópticos passivos operam melhor durante, pois dependem da luz solar refletida. Este fenômeno os torna dependentes do tempo, porque durante os dias nublados a luz do sol não é capaz de atingir a Terra.

Os sistemas de sensores remotos ópticos baseados em energia solar trabalham com base no princípio de que diferentes materiais refletem e absorvem diferentemente em diferentes comprimentos de onda na banda ótica; portanto, os objetos no solo podem ser diferenciados por suas assinaturas de reflectância espectral nas imagens de sensoriamento remoto (MAINI, 2010).

#### 2.6.1.1 Parâmetros do sensor

De acordo com Maini (2010), os principais parâmetros do sensor descritos resumidamente nos parágrafos a seguir incluem:

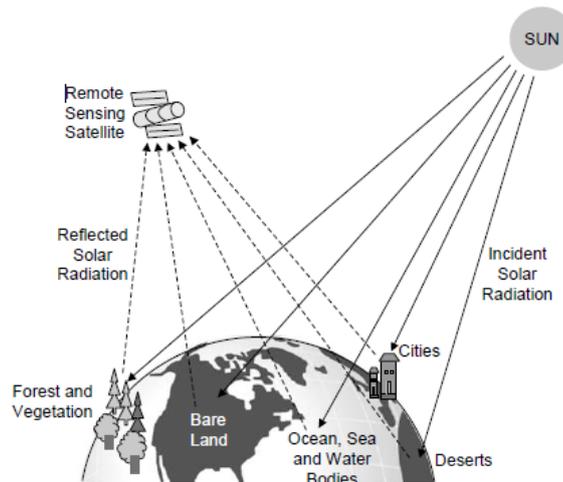


Figura 7 – Sensoriamento remoto óptico (MAINI, 2010)

1. Campo de visão instantâneo ou Instantaneous field-of-view (IFOV)
2. Campo de visão geral
3. relação S/N
4. Linearidade
5. banda de comprimento de onda
6. *Swath width*
7. *Dwell time*
8. Resolução

1. Campo de visão instantâneo (IFOV). Isso é definido como o ângulo sólido a partir do qual emana a radiação eletromagnética medida pelo sensor em um dado momento.
2. Campo de visão geral. Isso corresponde ao tamanho total da área geográfica selecionada para observação. No caso de sensores sem varredura, o campo instantâneo e o campo de visão total são iguais e coincidem um com o outro, enquanto que para os sensores de varredura, o campo de visão geral é um número inteiro múltiplo do campo instantâneo -Visão.
3. relação S/N. Isso define o nível mínimo de energia exigido pelo sensor para identificar um objeto na presença de ruído.
4. Linearidade. Linearidade refere-se à resposta do sensor aos níveis variáveis de intensidade de radiação. A linearidade é geralmente especificada em termos da inclinação da curva de resposta do sensor e é referida como "gama". Os sensores baseados em circuitos de estado sólido, como os CCDs, são lineares em uma ampla faixa em comparação com outros sensores, como câmeras de vídeo.

5. Faixa de comprimento de onda Os sensores empregam três bandas de comprimento de onda para aplicações de sensoriamento remoto: a banda ótica, a banda térmica e a banda de micro-ondas.
6. Swath width. A largura de faixa do sensor é a área na superfície da Terra que é representada por ele.
7. Dwell time. O tempo de espera do sensor é definido como a quantidade de tempo necessária para gerar um sinal forte o suficiente para ser detectado pelo detector contra o ruído.
8. Resolução. Resolução é definida como a capacidade de todo o sistema de sensoriamento remoto (incluindo a lente, a antena, a tela, a exposição, o processamento, etc.) para renderizar uma imagem nitidamente definida. A resolução de qualquer sistema de sensoriamento remoto é especificada em termos de resolução espectral, resolução radiométrica, resolução espacial e resolução temporal.

## 2.6.2 Mecanismos de imageamento multiespectral

Os principais mecanismos de imageamento por varredura são os sensores do tipo de varredura mecânica (*Whiskbroom*) e os do tipo varredura eletrônica (*Pushbroom*). As diferenças entre eles tem algumas implicações no poder de resoluções das imagens e em algumas técnicas de processamento de imagem.

1. *Whiskbroom*: Sensor imageador multiespectral de varredura mecânica com óptica externa de espelho rotativo. Varredura pixel a pixel por linha. Arranjo de detectores discretos.
2. *Pushbroom*: Sensor imageador multiespectral de varredura eletrônica com óptica de grande ocular. Varredura simultânea de todos os pixels de uma linha. Arranjo linear de milhares de detectores.

### 2.6.2.1 Sensores de Varredura Mecânica (Whiskbroom)

Este é um radiômetro multiespectral (um radiômetro é um dispositivo que mede a intensidade da radiação que emana da superfície da Terra) onde a varredura é feita em uma série de linhas orientadas perpendicularmente à direção do movimento do satélite usando uma rotação ou espelho oscilante.([CAMPBELL, 1944](#)–)

A principal característica deste tipo de sensor é o fato de o imageamento do terreno ser feito pixel a pixel ao longo de uma linha de várias dezenas ou centenas de quilômetros de extensão, no sentido transversal ao deslocamento do satélite. Daí serem também

denominados de sensores cross-track. A Figura apresenta com mais detalhe o esquema de varredura mecânica.

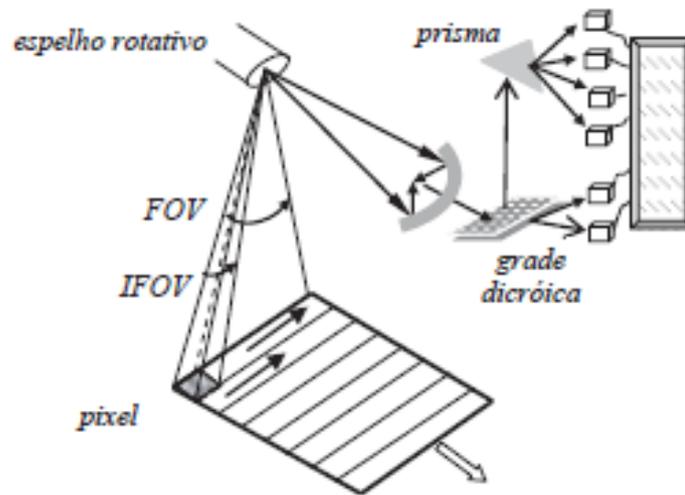


Figura 8 – Configuração esquemática do mecanismo de imageamento pixel a pixel de um sensor multiespectral de varredura mecânica. (MAINI, 2010)

O sistema óptico de visada do pixel é feito por um telescópio, e a sua designação como varredura mecânica é devido à existência no alinhamento de abertura do telescópio de um espelho plano de berílio inclinado de  $45^\circ$ , ligado a um eixo rotor que imprime uma altíssima rotação ou oscilação no sentido transversal ao deslocamento da plataforma. É esse movimento rotativo ou oscilante do espelho que varre o terreno em linhas perpendiculares à direção de voo. A radiação que chega ao espelho é refletida em direção ao telescópio, que a foca no sistema de dispersão e depois aos detectores. O movimento oscilatório do espelho permite que o scanner meça a radiação refletida de um lado a outro da faixa do terreno, ao longo da órbita da plataforma. O ângulo de oscilação  $\sigma$  do espelho plano, determina a largura da faixa imageada no terreno, denominado FOV (Field of View- Campo de visada). Conforme a plataforma avança, linhas sucessivas são varridas, até compor uma imagem.

Os sensores MSS, TM e ETM do satélite Landsat e o radiômetro AVHRR do satélite NOAA são exemplos de sensores de varredura mecânica.

### 2.6.2.2 Sensores de Varredura Eletrônica (Pushbroom)

Os sensores de varredura eletrônica possuem arranjos lineares de milhares de detectores que usam diodos ou dispositivos de cargas acopladas (CCD – Charge-Coupled-Devices), que nada mais é do que um chip de metal semiconductor montado em matrizes lineares ou bidimensionais. A óptica é de grande objetiva, que dispensa o uso de espelho rotativo. De um modo semelhante ao mecanismo dos sensores de varredura mecânica, os

sensores de varredura eletrônica registram a imagem ao longo de uma faixa no terreno, através de varreduras de linhas sucessivas orientadas ortogonalmente à direção de trajetória da plataforma. Por meio da óptica de grande angular cada linha é imageada no terreno em toda a sua extensão, num único instante, utilizando-se do arranjo de milhares de detectores acoplados a um circuito eletrônico - CCD. A configuração de um sensor de varredura eletrônica é apresentada na Figura 9. (MAINI, 2010)

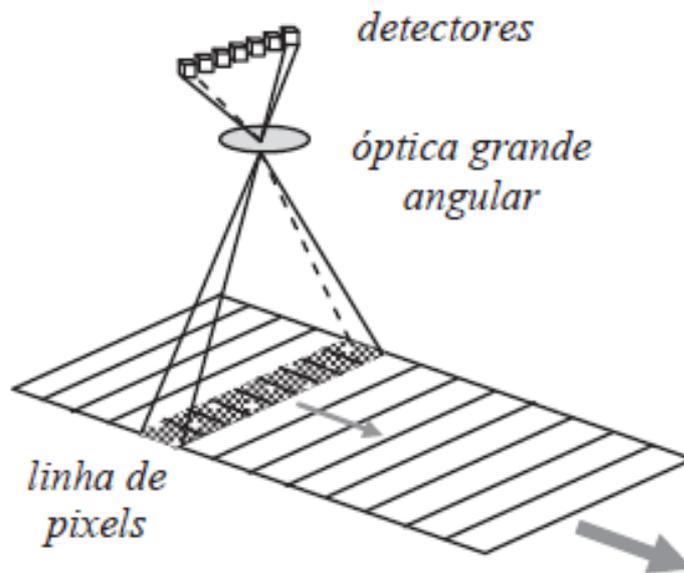


Figura 9 – Configuração esquemática do mecanismo de imageamento de um sensor de varredura eletrônica, com todos os pixels de uma linha imageados simultaneamente. (MAINI, 2010)

Cada detector é responsável para registrar a energia de um único elemento de área do terreno (pixel) ao longo de uma linha de varredura. Portanto, a amostragem do terreno não é feita pixel a pixel, mas todos os pixels de uma linha são imageados simultaneamente. À medida que a plataforma se desloca ao longo de sua trajetória de voo ou órbita, linhas sucessivas são imageadas no terreno pelo arranjo dos detectores. São assim denominados de sensores *along-track*. (CAMPBELL, 1944–)

Uma das desvantagens desses sistemas é que os detectores CCDs comercialmente disponíveis não são sensíveis para comprimentos de onda maiores do que o infravermelho próximo, o que limita a faixa espectral das imagens por eles obtida. A tecnologia de sensores *pushbroom* de arranjo linear é a melhor opção para sensores de alta resolução espacial. (MENESES, 2012)

### 2.6.3 Resolução

O termo resolução expressa uma medida da habilidade que um sistema sensor possui de distinguir objetos próximos espacialmente ou de respostas espectrais semelhantes. (SULSOFT, 2004)

Como dito anteriormente, quando a imagem é visualizada no monitor do computador, os DN dessa imagem são convertidos em valores de brilho (tons de cinza), estabelecendo-se uma escala linear de brilhos ou tons cinza. Assim, os DN menores são convertidos em tons de cinza escuros e os DN maiores em tons de cinza claros. Cada pixel representa uma localização definida em um sistema de coordenadas e possui ainda um atributo numérico referente à resposta espectral dos elementos presentes neste pixel. Estas imagens possuem diferentes características, expressas em função de suas resoluções.

Em sensoriamento remoto o termo resolução desdobra-se em quatro categorias questão intimamente ligados ao tipo de missão: a resolução espacial, a resolução espectral, a resolução radiométrica e resolução temporal.

Os conceitos e explicações tratadas a seguir, sobre resoluções, são válidas para todos os tipos de sensores imageadores, independente da faixa espectral em que operam, à exceção do radar.

#### 2.6.3.1 Resolução Espacial

Para [Meneses \(2012\)](#), resolução espacial é um importante parâmetro do sensor porque ela determina o tamanho do menor objeto que pode ser identificado em uma imagem. Por definição, um objeto somente pode ser resolvido (detectado), quando o tamanho deste é, no mínimo, igual ou maior do que o tamanho do elemento de resolução no terreno, ou seja, da resolução espacial.

Outra definição feita pela [SulSoft \(2004\)](#), a resolução espacial é determinada pela capacidade do detector em distinguir objetos na superfície terrestre. Ela especifica o tamanho do pixel da imagem de detecção remota. Para o autor [González Marcello Javier Ruiz \(2013\)](#), resolução pode ser definida:

- Alta resolução espacial: 0,5 - 4 m
- Média resolução espacial: 4 - 30 m
- Baixa resolução espacial: 30 - 1000 m

Para [Meneses \(2012\)](#), determinar qual deve ser a resolução espacial de um sensor, envolve para a maioria das aplicações de sensoriamento remoto, uma análise da relação do grau de autocorrelação da organização espacial dos objetos no terreno. Em terrenos

naturais os alvos apresentam uma alta correlação espacial, mostrando pouca variabilidade ao longo de uma área, não exigindo, para a sua identificação, altas resoluções espaciais.

Em geral, a resolução espacial de um detector é expressa em termos do seu campo instantâneo de visada ou IFOV (“instantaneous field of view”). O IFOV define a área do terreno focalizada a uma dada altitude pelo instrumento sensor, que é medido pelo ângulo  $\beta$ . O tamanho do ângulo  $\beta$  do IFOV é determinado pela abertura do sistema óptico em conjunção com o tamanho do detector, pois é o detector que mede a intensidade da radiância do terreno. Como nos sensores orbitais a óptica é a de um telescópio portátil, o valor do ângulo  $\beta$  do IFOV é de centésimos de miliradianos. (NOVO, 2001)

O diâmetro do elemento de amostragem no terreno (D) no terreno pode ser calculado pela equação:

$$D = H\beta \quad (2.6)$$

onde,

$H$  = altura do sensor em metros,

$\beta$  = ângulo IFOV em miliradianos.

O IFOV é uma medida angular e é determinado através da equação:

$$IFOV = \frac{d}{f} \quad (2.7)$$

onde,

$d$  = Dimensão do detetor,

$f$  = Distância focal.

Pode-se também determinar a dimensão linear do IFOV (9metros) a partir da equação:

$$IFOV = \frac{Hd}{f} \quad (2.8)$$

onde,  $H$  = altura da plataforma.

### 2.6.3.2 Resolução espectral

A resolução espectral é um conceito inerente às imagens multiespectrais de sensoriamento remoto. É definida pelo número de bandas espectrais de um sistema sensor e pela amplitude do intervalo de comprimento de onda de cada banda. (SULSOFT, 2004)

Sobre resolução espectral, para Meneses (2012), O termo resolução espectral envolve pelo menos três parâmetros de medida:

- O número de bandas que o sensor possui;
- A largura em comprimento de onda das bandas;

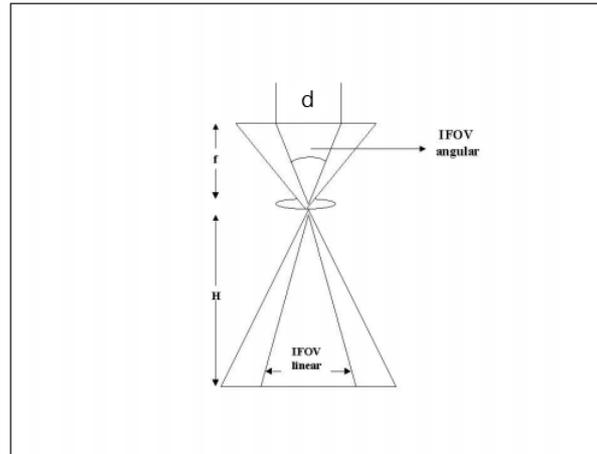


Figura 10 – Ilustração do conceito de IFOV

- As posições que as bandas estão situadas no espectro eletromagnético.

Em respeito aos parâmetros, o autor [González Marcello Javier Ruiz \(2013\)](#), O número de bandas não é o único aspecto importante da resolução espectral: A posição das bandas do espectro electromagnético é um aspecto chave.

Depreende-se que, quanto menor a largura de suas bandas, melhor é a resolução espectral. Bandas muito amplas pressupõem o registro de um valor médio do sinal refletido, mascarando a resposta espectral de diferentes objetos. A necessidade de um número de bandas é devido às diferenças relativas de reflectância entre os materiais da superfície da terra, que permitem distinguir um material do outro, em determinados comprimentos de onda.

Como exemplo, utilizando uma área da floresta amazônica, como dito anteriormente, na banda do visível, baixa reflectância da água e da vegetação são, praticamente, iguais nesse comprimento de onda, não havendo contraste entre os dois tipos de alvos. Na banda infravermelho próximo, os rios são facilmente identificados, porque a água possui uma baixa reflectância, enquanto a vegetação da floresta tem uma alta reflectância, estabelecendo uma razão de alto contraste entre os dois alvos.

### 2.6.3.3 Resolução Radiométrica

A medida pelos detectores da intensidade de radiância da área de cada pixel unitário é denominada de resolução radiométrica. A resolução radiométrica é dada pelo número de valores digitais representando níveis de cinza, usados para expressar os dados coletados pelo sensor. Quanto maior o número de valores, maior é a resolução radiométrica. ([SULSOFT, 2004](#))

Para [González Marcello Javier Ruiz \(2013\)](#), está relacionada sensibilidade de um detector de variações na intensidade da energia electromagnética emitida, refletida ou

dispersa a luz está a ser detectada.

Em termos práticos, a quantização do sinal é medida pelo intervalo de número de valores digitais usados para expressar os valores de radiância medidos pelo detector. A quantização é normalmente expressa em termos de números de dígitos binários (bits). Quanto maior é a quantização, maior será a qualidade visual da imagem. (MENESES, 2012) Este valor é sempre uma potência do número 2. Em regiões imaginemos uma área de floresta com árvores que exibem pequenas variações na intensidade da cor verde de suas folhas, que é o componente da vegetação que irá interagir com a luz solar incidente. Com uma imagem com pixel de 30 metros várias árvores estarão dentro da área do pixel. Nesse caso, a radiância medida pelo sensor será uma média da reflectância de várias árvores, e não de árvores individuais.

A floresta será, portanto, identificada nas imagens por uma textura tonal que será bem distinta de uma área vizinha com menor densidade de vegetação, como um cerrado *sensu strictu*. Isso nos diz que as imagens somente possibilitam diferenciar classes de alvo (mata e cerrado). Sendo assim, para reconhecer classes de alvos, não há necessidade de uma refinada medida da radiância, bastando uma imagem com resolução de 8 bits.

#### 2.6.3.4 Resolução temporal

Para o autor Steffen (2001), refere-se à frequência que o sensor revisita uma área e obtém imagens periódicas ao longo de sua vida útil, em outras palavras, o período de tempo compreendido entre duas coletas de dados sobre uma mesma superfície do terreno. Este domínio é expresso pela resolução temporal da plataforma que sustenta o sensor, podendo ser ela uma haste portátil, uma aeronave ou até mesmo um satélite.

A resolução temporal é fundamental para acompanhar ou detectar a evolução ou mudanças que ocorrem na Terra, principalmente para alvos mais dinâmicos, como o ciclo fenológico de culturas, desmatamentos, desastres ambientais, tendo forte impacto na monitoração ambiental. (MENESES, 2012)

Para González Marcello Javier Ruiz (2013), o tempo é importante quando: nuvens persistentes oferecem visão limitada direta da superfície da Terra; fenômenos de curto prazo (enchentes, vazamentos de óleo, etc.) e mudando rapidamente fenômenos (atmosférica). Para o mesmo autor, a resolução pode ser definida:

- Alta resolução temporal: < 1 dia - 3 dias
- Resolução temporal de média: 4 - 16 dias
- Baixa resolução temporal: > 16 dias

### 2.6.4 Processo de design de carga útil de observação

Seguindo o livro SMAAD (Space Mission Analysis and Design) do autor [Larson \(1999\)](#), que apresenta o cálculo para definir os parâmetros de um sensor passivo óptico. começamos com parâmetros básicos de projeto, com relação a órbita, como altitude da orbita até o centro da terra,  $R$ ,

$$R = H + R_e \quad (2.9)$$

o período orbital, da terceira lei de Kepler pode ser apresentado a seguir:

$$P = \left( \frac{2\pi}{\sqrt{\mu}} \right) R^{3/2} \quad (2.10)$$

Com esses valores podemos calcular a velocidade de trajetória espacial,  $V_g$  com a seguinte equação:

$$V_g = \frac{2\pi R_e}{P} \quad (2.11)$$

onde,  $R_e = 6378,14km$  como sendo o raio da terra.

O deslocamento do nó pode ser definido como espaçamento em longitude,  $\Delta L$  entre sucessivos cruzamentos de nó no equador, sendo ela

$$\Delta L = \frac{360^\circ}{PN_T} \quad (2.12)$$

onde,  $N_T$  representa o número de órbitas por dia,

$$N_T = \frac{24h \ 60min}{P} = \frac{1440min}{P}. \quad (2.13)$$

Em seguida, calculamos as quantidades que descrevem o desempenho do instrumento. Em particular, determinamos os parâmetros de processamento de pixel e a taxa de dados do sistema, o tamanho da ótica para um determinado tamanho de pixel e a radiometria do sensor. Para o calculo de IFOV, que representa o ângulo de abertura de um pixel com relação a resolução em solo, na altitude do satélite como

$$IFOV = \frac{X}{H} \left( \frac{180^\circ}{\pi} \right) \quad (2.14)$$

e

$$Y = IFOV H \left( \frac{\pi}{180^\circ} \right) \quad (2.15)$$

onde X representa resolução do solo "*cross-track*" e Y resolução do solo "*along-track*" de um pixel.

A taxa de dados necessária para cargas de observação depende da resolução, cobertura e precisão da amplitude. Com o ângulo de visão máximo,  $\eta$ , altitude do satélite,  $h$ , resolução do pixel "cross-track",  $X$ , têm-se

$$Z_c = \frac{2\eta}{IFOV} \quad (2.16)$$

que representa o número de pixels por linha de faixa "cross-track". Feito isso, com a velocidade  $V_g$  e resolução do pixel "along-track"  $Y$ , em um segundo, têm-se

$$Z_a = \frac{V_g \text{ 1sec}}{Y} \quad (2.17)$$

onde  $Z_a$  representa o número de faixas gravadas ao longo da pista em 1 segundo.

Quantificando a intensidade de cada pixel por  $b$  bits (níveis de amplitude de  $2^b$ ), pode definir a taxa de dados, DR (bits/segundos (bps)), de

$$DR = \frac{2\eta h}{X} \frac{V_g}{Y} b \approx \frac{S_w}{X} \frac{V_g}{Y} b \quad (2.18)$$

onde  $\eta$  é o ângulo de visão máximo em radianos,  $h$  é a altitude da órbita,  $V_g$  é a velocidade da trajetória terrestre da espaçonave,  $S_w$  é a largura da faixa,  $X$  é a dimensão do pixel em toda a trilha e  $Y$  é a dimensão do pixel ao longo da trilha. A aproximação é boa para larguras de faixa pequenas.

Outro calculo que pode ser definido é a estimativa do tamanho, peso e potência do sensor, que são características importantes da missão. O livro SMAAD (1999) apresenta uma aproximação de design preliminar. O dimensionamento baseia-se no diâmetro de abertura da lente,  $A$ , com a seguinte equação:

$$A = \frac{2.44H\lambda}{X}. \quad (2.19)$$

Definida a abertura da lente, calcula-se a abertura relativa, dada por

$$R = \frac{A_i}{A_o} \quad (2.20)$$

onde  $A_i$  é a abertura necessária do nosso novo instrumento, e  $A_o$  é a abertura de um instrumento similar (Apêndice 36). Em seguida, estimamos o tamanho, pela dimensão Linear,  $L$ , o volume,  $V$  o peso,  $W$  e a potência,  $P$ , com base nas proporções com o instrumento selecionado da Tabela 9-13, usando o seguinte:

$$L_i \approx RL_o \quad (2.21)$$

$$S_i \approx L_i^2 \quad (2.22)$$

$$V_i \approx L_i^3 \quad (2.23)$$

$$W_i \approx KR^3W_0 \quad (2.24)$$

$$P_i \approx KR^3P_0 \quad (2.25)$$

O fator K deverá ser 2 quando R for menor que 0,5, e 1 maior que 0.5. Isso reflete um fator adicional de 2 em peso e potência para aumentar a margem ao reduzir o sistema por um fator de mais de 2.

## 2.7 Sensores de imageamento RADAR

### 2.7.1 Conceitos Básicos

O termo RADAR é uma sigla derivada de "*Radio Detection And Ranging*". Nas imagens óticas obtidas tanto por aerolevanteamento como por satélites, precisamos de uma fonte de luz para que o filme fotográfico ou o sensor eletrônico, sejam sensibilizados pela radiação refletida pelo alvo no terreno. Neste caso temos exemplo de sensores passivos. Já o radar emite a sua própria fonte de radiação, na faixa do micro-ondas, captando o sinal de retorno refletido pelo alvo. (SULSOFT, 2004)

Para o autor Maini (2010) Os sistemas de sensoriamento remoto nas micro-ondas geralmente operam na faixa de comprimento de onda de 1 cm a 1 m. A radiação de micro-ondas pode penetrar através das nuvens, neblina e poeira, tornando a detecção remota de micro-ondas uma técnica independente do tempo. Esse recurso torna os sistemas de sensoriamento remoto de micro-ondas bastante atraentes em comparação com os sistemas ópticos e térmicos, que são dependente. Os sistemas de sensoriamento remoto por micro-ondas funcionam tanto durante o dia quanto à noite, pois são independentes das condições de iluminação solar, como mostra a figura 11.

Bandas mais curtas de comprimento de onda de micro-ondas são utilizadas para a análise de recursos minerais ocultos à medida que eles penetram através da superfície da Terra e da vegetação, enquanto bandas de comprimento de onda mais longas são utilizadas para determinar a rugosidade das várias características da superfície da Terra. Os sistemas de sensoriamento remoto por micro-ondas podem ser tanto passivos quanto ativos (MAINI, 2010).

De acordo com Novo (2001), um RADAR executa três funções básicas:

1. transmissão em pulsos de micro-ondas em direção a um alvo;
2. Recepção da porção refletida do pulso transmitido após o mesmo ter interagido com o alvo (a porção refletida recebe o nome de energia retro-espalhada);

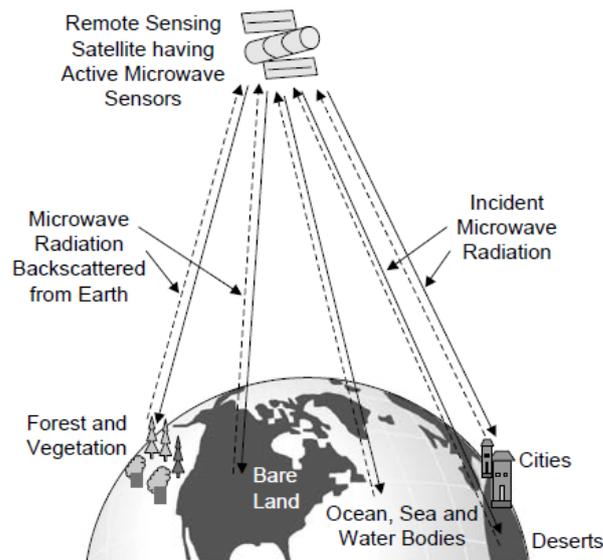


Figura 11 – Sensoriamento remoto ativo por micro-ondas (MAINI, 2010)

3. Registro de potência, a variação temporal e o tempo de retorno do pulso retro-espalhado.

A configuração básica de um sistema RADAR pode ser observada na figura 12.

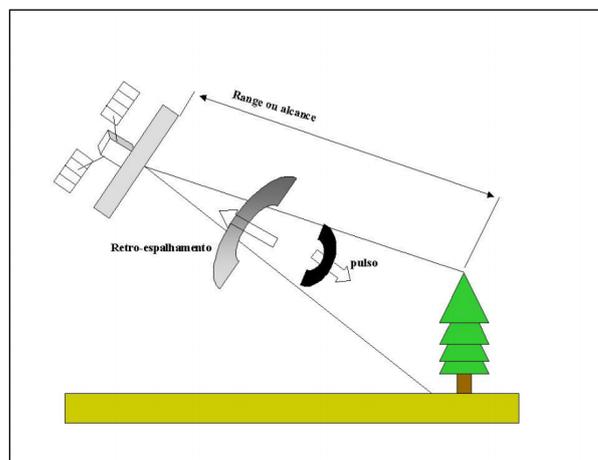


Figura 12 – Configuração básica de um sistema RADAR. (NOVO, 2001)

O sinal retro-espalhado pelo alvo é influenciado pelas características do pulso incidente (comprimento de onda, polarização), pela geometria do sistema radar em relação à superfície terrestre, a geometria local, ou seja a geometria do pulso em relação ao alvo.

O sistema RADAR transmite um pulso de micro-ondas numa direção perpendicular ao deslocamento da plataforma. A direção de transmissão do pulso é conhecida como “range” ou alcance. O sensor é capaz de determinar as distâncias relativas dos objetos da superfície ao longo dessa direção a partir da análise do tempo que a pulso emitido leva

para “viajar” até o objeto e retornar ao sensor. O sinal proveniente de um objeto localizado mais próximo ao sensor levará menos tempo para retornar do que um objeto localizado mais distante. A imagem de RADAR é construída na medida em que a plataforma avança e sucessivos pulsos são transmitidos e recebidos pela antena. (NOVO, 2001)

Do ponto de vista das atividades de sensoriamento remoto, o fato dos sistemas de RADAR operarem nesses comprimentos de onda, traz algumas vantagens:

- As micro-ondas são passíveis de penetrarem nuvens, chuva, fumaça e neblina. Em comprimentos de ondas menores (6 cm) chuvas e nuvens espessas podem afetar o sinal de radar;
- As micro-ondas são sensíveis a propriedades distintas daquelas que afetam a radiação na região do visível e infravermelho. As imagens de radar apresentam informações que são qualitativamente e quantitativamente diferentes daquelas registradas em imagens ópticas, sendo portanto, complementares àquelas.

As bandas de operação para os sensores de micro-ondas operam em bandas específicas para as quais foram associadas letras. Como apresenta a Tabela 2.7.1.

## 2.7.2 Interações entre a radiação de micro-ondas e a superfície terrestre

Segundo Novo (2001), assim como em outras regiões do espectro eletromagnético, a radiação de micro-ondas apresenta uma série de características específicas de interação com a matéria que a diferencia de outras regiões do espectro. Dentre as características da radiação de micro-ondas destacam-se:

- Sensibilidade à estrutura macroscópica dos materiais
- Sensibilidade a propriedades elétricas dos materiais

As interações entre a radiação de micro-ondas e os objetos da superfície terrestre são afetadas por dois grandes conjuntos das principais variáveis: (1) Variáveis ligadas ao sistema radar tais como: comprimento de onda, ângulo de iluminação do pulso de micro-ondas, direção de imageamento, polarização, resolução. (2) Variáveis ligadas ao objeto imageado tais como constante dielétrica, rugosidade, dimensão, etc.

### 2.7.2.1 Principais Variáveis

- A. *Comprimento de onda  $\lambda$* . O comprimento de onda é uma variável importante porque controla o coeficiente de retro-espalhamento e a profundidade de penetração da radiação nos objetos da superfície. A constante dielétrica dos objetos varia com a

| <b>Banda</b> | <b>Comprimento de onda (cm)</b> | <b>Frequência (GHz)</b> | <b>Principal aplicação</b>                                |
|--------------|---------------------------------|-------------------------|---|
| <b>X</b>     | <b>2,4-3,8</b>                  | <b>8,0-12,5</b>         | <b>Reconhecimento militar, reconhecimento de terreno</b>  |
| <b>C</b>     | <b>3,8-7,5</b>                  | <b>4,0-8,0</b>          | <b>Monitoramento de gelo e aplicações oceanográficas.</b> |
| <b>S</b>     | <b>7,5-15,0</b>                 | <b>2,0-4,0</b>          | <b>Reconhecimento de terreno</b>                          |
| <b>L</b>     | <b>15,0-30,0</b>                | <b>1,0-2,0</b>          | <b>Mapeamento de cobertura vegetal</b>                    |
| <b>P</b>     | <b>75,0-133,0</b>               | <b>0,3-1</b>            | <b>Mapeamento de cobertura vegetal</b>                    |

frequência da radiação incidente, a qual afeta o coeficiente de retro-espalhamento. A profundidade de penetração da radiação de micro-ondas também é afetada pela frequência. Para a maioria dos materiais da superfície terrestre a profundidade de penetração varia linearmente com o comprimento de onda. Assim sendo, a profundidade de penetração da banda L é 10 vezes maior do que a da banda X. Para áreas com vegetação, isso implica que os sensores SAR de banda X espalhem-se principalmente no topo das copas das árvores, enquanto os sinais das bandas C e L penetram cada vez mais profundamente no volume da vegetação (Figura 13). (FLORES-ANDERSON KELSEY HERNDON, 2019)

B. *Ângulo de incidência*  $\psi$ . O ângulo de incidência pode ser definido como o ângulo

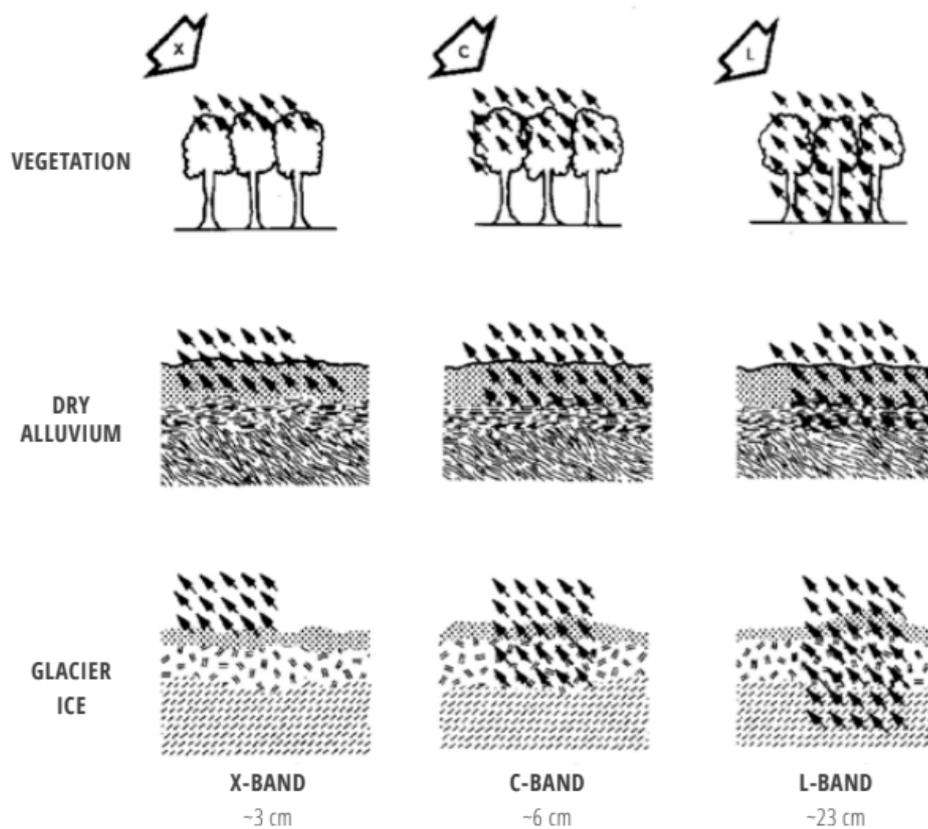


Figura 13 – Penetração do sensor SAR pelo comprimento de onda  $\lambda$ . (FLORES-ANDERSON KELSEY HERNDON, 2019)

formado entre o vetor de range e a direção vertical local. Como a faixa imageada pelo radar recobre uma ampla região do terreno, suas imagens estão sujeitas a diferenças de retro-espalhamento em função da distância (e portanto do ângulo) entre a plataforma de aquisição e o objeto imageado. A região mais próxima à antena (*near range*) tende a produzir valores mais elevados de retroespalhamento do que a região distante da antena (*far range*) em decorrência das modificações no ângulo de incidência local. (NOVO, 2001)

Quanto menor for o ângulo de incidência local, mais intenso será o retorno do sinal. (MENESES, 2012)

- C. *Direção de Imageamento R*. A direção de imageamento se refere à orientação geométrica do feixe transmitido em relação a feições lineares do terreno como culturas agrícolas, acidentes topográficos e lineamentos geológicos. Quando a direção de imageamento é perpendicular à feição linear há um aumento da interação entre ela e a frente de onda. Com isto, há um aumento no coeficiente de retro-espalhamento. Ao contrário, quando a feição linear é paralela à feição do terreno, há menor interação entre ela e a radiação incidente, havendo conseqüentemente uma redução no coeficiente de retro-espalhamento.

Ela é também importante para qualquer tipo de alvo que tenha uma orientação dominante no terreno, como linhas de plantio de culturas agrícolas ou direções de arruamentos urbanos. (MENESES, 2012)

- D. *Polarização*. Para um sistema radar, a polarização se refere à orientação do campo elétrico em relação a um certo plano de referência. A maioria das antenas de radar são construídas de modo a transmitirem e receberem ondas polarizadas linearmente, seja horizontalmente ou seja verticalmente. Uma onda é transmitida verticalmente polarizada quando a antena é orientada de modo que o campo elétrico ocupe o plano definido pelo vetor perpendicular à superfície da Terra (geóide) e o vetor de range. A onda é transmitida horizontalmente polarizada quando é orientada perpendicularmente àquele plano. Em outros sistemas, como os SARs circulares ou elipticamente polarizados, a orientação do plano de oscilação muda, descrevendo formas geométricas como elipses ou círculos. (NOVO, 2001)

A maioria dos sensores de SAR da atualidade são polarizados linearmente e transmitem formas de onda polarizadas horizontalmente e/ou verticalmente. Sensores mais recentes fornecem capacidades de polarização dupla ou de polarização quádrupla. Nesta última, o sensor alterna entre a transmissão de formas de onda polarizadas em H e V e a recepção simultânea de H e V, fornecendo imagens polarizadas em HH, HV, VH e VV. Conhecer a polarização a partir da qual uma imagem SAR foi adquirida é importante, pois os sinais em diferentes polarizações interagem diferentemente com os objetos no solo, afetando o brilho do radar registrado em um canal de polarização específico. (FLORES-ANDERSON KELSEY HERNDON, 2019)

- E. *Constante Dielétrica*. Constante dielétrica corresponde à capacidade dos materiais em formar dipolos na presença de um campo elétrico externo e em armazenar e conduzir energia elétrica. Os alvos naturais, para terem altas constantes dielétricas, precisam conter água livre na sua estrutura (umidade), isso porque a água tem uma alta constante dielétrica, próxima de 80. Rochas e solos, em suas condições naturais (secos), possuem uma baixa constante dielétrica, entre 3 a 8. Quanto maior for a constante dielétrica do material, maior é a interação do campo elétrico do pulso de micro-ondas com a molécula de água e mais intenso é o retorno do sinal. Por isso, as vegetações fotossinteticamente ativas que armazenam água em suas estruturas foliares internas apresentam tons de cinza muito claros nas imagens de radar. De modo geral, na natureza a água, a vegetação verde, os metais, os sais possuem elevada constante dielétrica, enquanto a areia, vegetação morta, solos secos possuem baixa constante dielétrica. (MENESES, 2012)

- F. *Resolução Espacial*. A resolução espacial é uma das variáveis mais importantes para a determinação do conteúdo de informação das imagens de radar. A resolução é definida como a habilidade do sensor identificar dois alvos próximos como pontos

distintos. No caso dos sistemas de radar existem dois tipos de resolução espacial, a resolução na direção azimutal e a resolução na direção de range. A resolução azimutal é definida pelo processamento de sinal tal que nos sistemas de abertura sintética (SAR) ela se torna independente do tamanho da antena. A resolução na direção de range é determinada pelo largura do pulso transmitido e por sua duração. (NOVO, 2001)

### 2.7.3 Tipos de Sistemas RADAR

Os dois principais tipos de imagens RADAR são: PPI (*plan-position indicator*) de varredura circular e visada lateral. As aplicações do PPI estão limitadas ao monitoramento do tráfego aéreo e naval. As aplicações de sensoriamento remoto usam imagens de visada lateral que são divididas em dois tipos: RADAR de Abertura Real (geralmente chamado de SLAR-*Side-Looking Airborne Radar*- para RADAR aerotransportado de visada lateral e SBR-*Space Based Radar*- para radar baseado no espaço) e radar de abertura sintética (SAR). (DABROWSKA WANDA KOWALIK, 2009)

Abertura significa a abertura usada para coletar a energia refletida que é usada para formar uma imagem. No caso de imagens de RADAR, esta é a antena. O comprimento de uma antena RADAR especifica parcialmente a área pela qual ela coleta sinais de radar.

Em geral, segundo o mesmo autor, quanto maior a antena, mais informações exclusivas podem ser obtidas sobre um determinado objeto visualizado. As limitações para colocar antenas RADAR maiores no espaço são altas devido ao custo e tamanho da plataforma. Existem outras formas de obter uma resolução precisa, com o movimento da plataforma e técnicas avançadas de processamento de sinal para simular uma antena maior.

### 2.7.4 Radar de Abertura Real - RAR

Segundo Flores-Anderson Kelsey Herndon (2019), os radares de abertura real são configurados de tal modo que a resolução espacial na direção azimutal seja proporcional à distância entre o sensor e a superfície. A antena emite pulsos de energia eletromagnética direcionados perpendicularmente à trajetória de voo da plataforma e para baixo até a superfície da Terra. A largura do feixe da antena ( $\beta$ ) determina a resolução espacial na direção azimutal. Assim sendo o tamanho do pixel varia em tamanho do *near range* para o *far range*. Nos sistemas de abertura real a resolução diminui com a diminuição da distância do pulso à antena. A configuração de observação de um sistema SLAR é mostrada na Figura 14 e consiste em um sensor de radar montado em uma plataforma aérea (ou espaçada) que, neste exemplo simplificado, está se movendo ao longo de um caminho reto na altitude H.

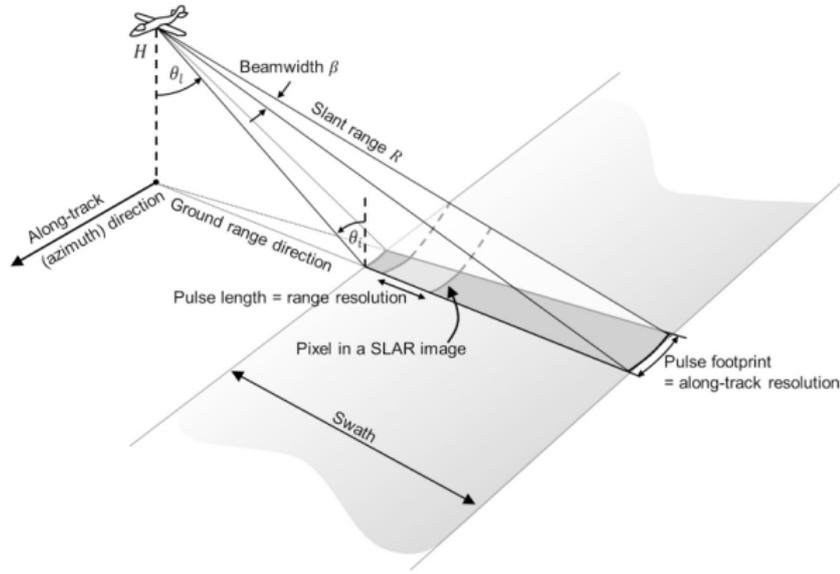


Figura 14 – Geometria de observação de SLAR. (FLORES-ANDERSON KELSEY HERNDON, 2019)

Enquanto percorre sua pista, o sistema de radar está transmitindo uma sequência de pulsos curtos de micro-ondas de comprimento do pulso  $\tau_p$ , cada um dos quais ilumina uma área instantânea no solo, que é geralmente referida como a área recoberta da antena. O tamanho  $S$  (metros), na Figura 14 dessa área instantânea na direção do range ou na direção longitudinal (azimute) é amplamente definida pela relação entre o comprimento de onda do sistema  $\lambda$  e o comprimento lateral da antena  $L$  (definindo a largura de feixe da antena por  $\beta = \lambda/L$ ) nesta direção, bem como pela distância do sensor de radar a partir do solo  $R$ :

$$S \approx \frac{\lambda}{L} R = \beta R. \quad (2.26)$$

A resolução do *range*,  $\rho_R$  (metros) de um sistema SLAR é definida por

$$\rho_R = \frac{c\tau_p}{2}, \quad (2.27)$$

onde,  $c$  = velocidade da luz.

A variável  $\rho_R$  é geralmente referida como a resolução de range inclinado de um sistema SLAR, pois descreve a capacidade de um SLAR distinguir objetos a diferentes distâncias do RADAR (*slant range direction*). O livro SAR Handbook (2019) define que, para sensoriamento remoto tem mais interesse na resolução de solo recoberto (*ground range resolution*)  $\rho_G$ , em metros, que descreve a capacidade de distinguir objetos que

estão situados no solo e é calculada a partir de  $\rho_R$  através do ângulo de incidência local  $\theta_i$ :

$$\rho_G = \frac{\rho_R}{\sin \theta_i}. \quad (2.28)$$

Seguindo o mesmo livro, na direção longitudinal (ou azimutal), o solo é imageado pelo movimento do RADAR ao longo de sua trilha. No caso de sistemas SLAR, a resolução do azimute  $\rho_{Az}$  (a capacidade de discriminar objetos na direção do azimute) é definida pelo comprimento da área recoberta da antena no azimute  $S_{Az}$ , que, por sua vez, é limitada pelo comprimento lateral  $L_{Az}$  da antena nessa direção. Assim, seguindo a Equação 2.26, a resolução do azimute, em metros, corresponde a

$$\rho_{Az} = S_{Az} \approx \frac{\lambda}{L_{Az}} R = \beta_{Az} R. \quad (2.29)$$

Equação 2.29 indica que a resolução do azimute  $\rho_{Az}$  está diminuindo linearmente com o aumento da distância  $R$  entre o sensor e a terra.

### 2.7.5 *Syntetic Aperture Radar* - SAR

Para [Meneses \(2012\)](#), uma definição básica dos radares de abertura sintética, que são a tecnologia hoje utilizada para todos os sistemas de radares transportados em aviões ou satélites, empregam uma antena de tamanho físico pequeno que sintetiza uma antena de tamanho de centenas de metros.

Segundo o livro *SAR Handbook (2019)*, O princípio de síntese de abertura permite essencialmente criar (ou “sintetizar”) uma antena efetiva muito mais longa (a chamada abertura sintética) a partir de uma sequência de aquisições feitas com uma antena mais curta à medida que ela se move ao longo de sua linha de combate. Como o comprimento da antena está intrinsecamente ligado às capacidades de resolução de um sistema de radar (sabemos da Equação 2.26), a antena muito mais longa sintetizada pelo princípio de Wiley permite imagens de alta resolução até mesmo de plataformas espaciais usando hardware de antena de tamanho gerenciável.

Seguindo o mesmo livro, para aplicar o conceito de síntese de abertura de Wiley, primeiro precisamos garantir que um objeto  $P$  na superfície da Terra seja visualizado por muitos pulsos de radar consecutivos enquanto o feixe de antena varre o solo. Este requisito é indicado na Figura 15 por várias posições de antena que iluminam o objeto  $P$  quando o sensor se move do ponto  $x_1$  (o primeiro objeto de tempo  $P$  é visto) para o ponto  $x_2$  (a última vez que  $P$  é observado). Depois que os dados do radar são adquiridos, uma abordagem de pós-processamento é aplicada para combinar todas as aquisições entre  $x_1$  e  $x_2$  e em um único conjunto de dados que parece ter sido adquirido com uma antena

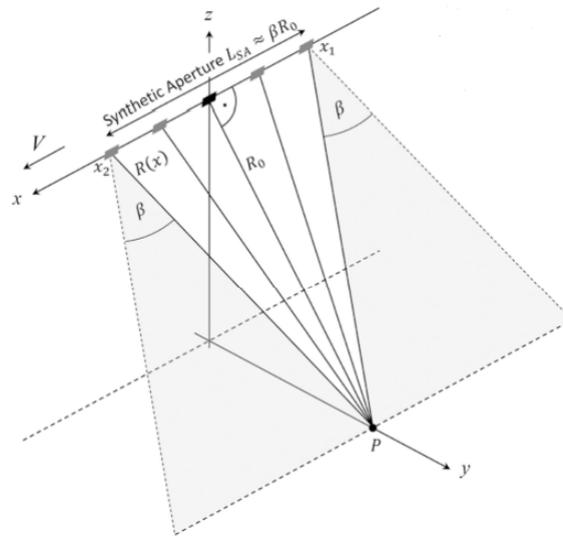


Figura 15 – Geometria das observações usadas para formar a abertura sintética para o alvo P na posição longitudinal em  $x = 0$ . (FLORES-ANDERSON KELSEY HERNDON, 2019)

muito mais longa. Esta antena mais longa (virtual) é tipicamente chamada de “abertura sintética”, uma vez que foi sintetizada a partir de várias aquisições com antenas mais curtas. O comprimento  $L_{SA}$  desta abertura sintética pode ser calculado via

$$L_{SA} = \frac{\lambda}{L} R_0 \approx \beta R_0 \quad (2.30)$$

e é equivalente à área iluminada S pela antena real (menor) instalada na espaçonave (Equação 2.26).

### 2.7.6 SAR para Mapeamento de Desmatamento e Degradação Florestal

Como um recurso natural vital, as florestas fornecem uma série de serviços ecossistêmicos, incluindo o sequestro de carbono, diversos habitats naturais para flora e fauna, que são uma fonte importante de alimentos e nutrientes para o consumo humano. O sensoriamento remoto da mudança de floresta tem uma importante função nesse esforço de monitoramento. Enquanto dados ópticos já por muito tempo foi ‘motor’ para monitoramento florestal, o advento da disponibilidade do SAR operacional oferece um complemento valorizável com uma sensibilidade crucial: sensores de micro-ondas remotos são largamente nuvem-penetradoras e então garantem monitoramento contínuo, mesmo sobre os céus nublados. (FLORES-ANDERSON KELSEY HERNDON, 2019)

Para nações tropicais, isso é particularmente importante como o cobrimento de nuvens contínuas limita severamente a disponibilidade de dados ópticos em uma média resolução. (DABROWSKA WANDA KOWALIK, 2009)

### 2.7.7 Características do SAR para mapeamento florestal

Valores de retro-espalhamento do SAR são determinado por dois grupos principais de características: sensor e características do alvo. O primeiro grupo inclui a frequência/comprimento de onda do SAR, polarização do sinal SAR transmitido e recebido, ângulo de incidência do pulso do radar interagindo com o chão, e direção da visão do sensor. A combinação dessas características deve ser considerado quando interpretando e analisando a imagem do SAR. O outro grupo de características determinando o retro-espalhamento do SAR de florestas e outros alvos naturais e artificiais são relacionados com as características do alvo. Em geral, assumindo características de imagem de sensor, retro-espalhamento do SAR é uma função do conteúdo úmido do alvo e características estruturais. Para florestas, isso significa que o volume (biomassa) de floresta e complexidade estrutural (troncos de floresta, galhos, e folhas) pode indicar espécies presentes (exemplo, pinhos vs. decíduas).

As principais características para mapeamento florestal por SAR, definidas no livro SAR Handbook (2019), serão apresentadas nos tópicos a seguir:

- A. *Papel da frequência em florestas.* Frequência do SAR determina a comprimento de onda da onda eletromagnética interagindo com outros alvos como florestas. Resumidamente, quanto maior a comprimento de onda (isto é, quanto menor a frequência), mais a onda penetra nas coberturas da floresta e interage maiores partes do volume da floresta (Figura 16). Em uma visão simplificada, pode-se atribuir a banda-X (em quase 3 cm) para majoritariamente coroa e pequenos galhos e folhas/agulha espalhada. A banda-C (5 cm) penetra geralmente mais profundo em coroas e espalhados em galhos de médio tamanho. A banda-L (23 cm) e banda-P (40 cm) tem a capacidade de penetração mais forte e interage com maiores partes de árvores como grandes galhos e troncos. Portanto, banda-L e maiores comprimentos de onda são comumente conectados com um forte componente de espalhamento de “batimento-duplo” (*double-bounce*), onde a energia incidente é espalhada para o chão onde bate de volta para o sensor (similar a bola de raquete ou o espremer).

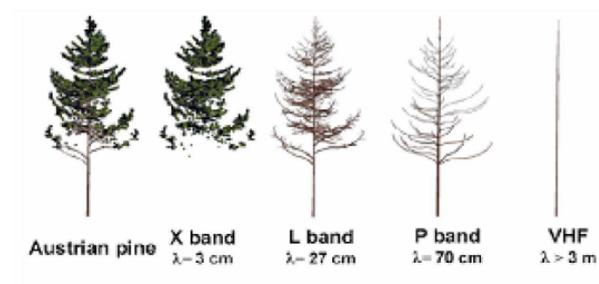


Figura 16 – Percepção de biomassa por diferentes comprimentos de onda. (DABROWSKA WANDA KOWALIK, 2009)

B. *Papel da polarização em florestas.* É importante considerar a polarização de ondas de radar interagindo com florestas, que determina como o sinal interage com os troncos e componentes das coroas. O mais importante é que a retro-espalhamento da polarização principal (VV, HH) (isto é, mesmos componentes de transmissão e recebimento) é tipicamente mais forte para componentes de espalhamento, onde, no entanto, a energia medida de detecção na polarização cruzada (VH ou HV) (ou seja, medindo energia retornando à 90° para a onda de transmissão) é associado com a medida do volume de espalhamento. Para aplicações de biomassa, rastreamento de degradação de floresta e identificar mudanças de volumes para superfícies, observações polarizadas cruzadas com imagem SAR são essenciais. A Figura 17 mostra um diagrama simplificado de como comprimentos de onda longos e curtos em polarizações horizontais e verticais interagem com as florestas.

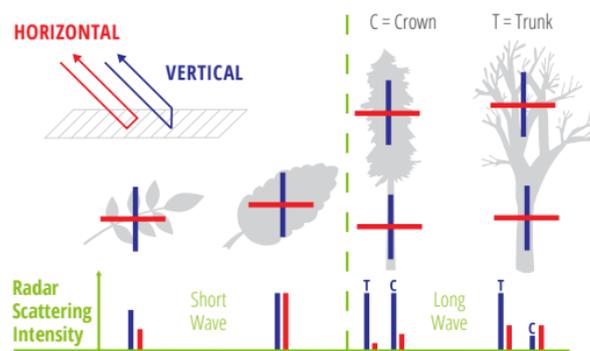


Figura 17 – Efeito esquemático da polarização de retro-espalhamento em comprimentos de onda longos e curtos, dispersos de troncos 'trunk' e coroas 'crown'

C. *Papel da umidade em florestas.* SAR é muito sensível à umidade em solos e vegetações, e também para água parada e água parada abaixo da cobertura. Aumentando o conteúdo de umidade em solos e vegetação tende a aumentar os sinais de retro-espalhamento. Água parada tem características de imagens muito escuras devido a maioria de sua energia ser espalhada na direção oposta do sensor; porém, quando o vento, correntes, ou motores de barco perturbam as superfícies da água, fortes retro-espalhamentos podem originar de superfícies abertas de água. Em particular, comprimentos de ondas mais pequenos tipo o C- e a banda-X tem retro-espalhamento de superfície de água parada forte de superfícies de água perturbada. Em comprimentos de ondas mais longas, o efeito de batimento-duplo 'double-bounce' mencionado no passado embaixo de coberturas podem ter um forte sinal de retro-espalhamento.

D. *Papel da estrutura.* Além das condições de umidade, as características estruturais da vegetação determinam o retro-espalhamento do SAR das florestas. Isto inclui tanto a estrutura horizontal (isto é, densidade da copa, plantações em fileira, textura) como a estrutura vertical (isto é, profundidade da copa, biomassa da coroa e do

tronco, estrutura das folhas e ramificações, formas de vida das árvores, crescimento corrente ou decorrente).

#### 2.7.7.1 Resumo: Desmatamento do ponto de vista do SAR

Simplificando o trabalho apresentado por [Flores-Anderson Kelsey Herndon \(2019\)](#), a característica de comportamento do retro-espalhamento pode ser resumido como seguinte:

- Desmatamento - O desmatamento é predominante na mudança de volume da superfície. Isso significa que o retro-espalhamento na polarização cruzada (VH, HV) diminui significativamente. Para detecção, as observações deve ser feitas em séries temporais que revelarão essas transições.

#### 2.7.8 Uso da terra e cobertura vegetal

O mapeamento e a classificação da cobertura do solo correspondem à identificação da condição física da superfície da Terra e a divisão da área em várias classes, como floresta, pastagem, neve, corpos de água, etc., dependendo de sua condição física. A classificação da cobertura do solo ajuda na identificação da localização dos recursos naturais ([CICCOLELLA, 2010](#)). O acompanhamento temporal da terra aos poucos vão apresentando mudanças devido ao uso da terra.

Para o autor [Maini \(2010\)](#) A mudança da cobertura do solo refere-se às mudanças sazonais ou permanentes nos tipos de cobertura da terra. Mudanças sazonais podem ser devidas a mudanças na agricultura ou mudanças na cobertura florestal e mudanças permanentes podem ser devidas a mudanças no uso da terra, como desmatamento ou novas cidades, etc. A detecção de mudanças permanentes na cobertura da terra é necessária para atualizar os mapas de cobertura e gestão. recursos naturais. Os satélites detectam essas mudanças permanentes na cobertura da terra comparando uma imagem antiga e uma imagem atualizada, com ambas as imagens tiradas durante a mesma temporada para eliminar os efeitos da mudança sazonal.

#### 2.7.9 Órbita Sol-Síncrona

Uma órbita síncrona ao sol, também conhecida como órbita helio-síncrona, é aquela que se encontra em um plano que mantém um ângulo fixo em relação à direção terra-sol. Em outras palavras, o plano orbital tem uma orientação fixa em relação à direção terra-sol e o ângulo entre o plano orbital e a linha terra-sol permanece constante ao longo do ano ([MAINI, 2010](#)), como mostra a Figura 18.

Como resultado dessa propriedade, órbitas sincronizadas com o sol garantem que:

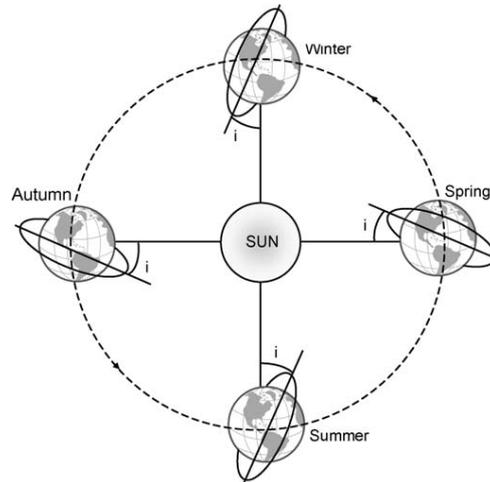


Figura 18 – Órbita Sol-Síncrona (MAINI, 2010)

1. O satélite passa por um determinado local da Terra todas as vezes no mesmo horário solar local, garantindo assim quase as mesmas condições de iluminação, variando apenas com as estações do ano.
2. O satélite garante cobertura de toda a superfície da Terra, sendo de natureza quase polar.

Toda vez que um satélite síncrono do Sol completa uma revolução ao redor da Terra, ele atravessa uma fina faixa na superfície da Terra. Para que isso ocorra, o plano orbital deve girar no espaço inercial com a mesma velocidade angular da Terra em sua órbita ao redor do Sol, que é de  $360^\circ$  por 365,26 dias, ou  $1,991 \times 10^{-7}$  rad/s, ou  $0,9856^\circ$  por dia (CICCOLELLA, 2010).

O autor Boain (2004) demonstrou que o RT (*Revisit Time*) pode ser um parâmetro para criar SSOs exclusivos usando:

$$T_0 = \frac{86400RT}{R} \quad (2.31)$$

em que,  $T_0$  é o período orbital e  $R$  é o número de revoluções completas do satélite ao redor da Terra durante cada RT. Após calcular o período da órbita, aplicando a equação de Kepler, as altitudes da órbita para um SSO podem ser calculadas. Inquestionavelmente, a altitude da órbita tem uma grande influência nos requisitos da missão e no desempenho do satélite (RAVANBAKSH, 2013).

### 2.7.9.1 As Perturbações Orbitais em SSO

Quando define uma órbita SSO, devemos considerar as dimensões da terra, que no caso, é um esferóide oblato. Sem a perfeita simetria de uma esfera. Esta falta de simetria

significa que a força da gravidade em um corpo em órbita não é direcionada para o centro da Terra (CICCOLELLA, 2010).

Como o campo gravitacional de um corpo perfeitamente esférico depende apenas da distância de seu centro, a obliquação causa uma variação também com a latitude: isso é chamado de variação zonal (CICCOLELLA, 2010).

O parâmetro adimensional que quantifica os principais efeitos em órbitas é chamado  $J_2$  que possui valor de  $1,08263 \times 10^{-3}$  para a Terra (CICCOLELLA, 2010).

A equação operativa que descreve a taxa na qual a linha de nós se move devido a essa protuberância é dada por:

$$\dot{\Omega} = -\frac{3}{2}J_2 \left(\frac{a_e}{p}\right)^2 \cos i \quad (2.32)$$

onde  $p = a(1 - e^2)$

Esta relação define a taxa de regressão nodal de uma órbita, qualquer órbita. Ele nos diz que, se pudermos especificar valores para a inclinação e a altitude da órbita, a taxa de precessão poderá ser computada. Ou, inversamente, dada a taxa de precessão e a altitude, obtemos facilmente a inclinação. O que é necessário agora é uma especificação da taxa nodal que fornece a propriedade já mencionada como a característica fundamental de um SS-0, isto é, mantém a geometria de seus nós fixos em relação ao sol (BOAIN, 2004).

### 2.7.10 Figura de Mérito

Trata-se em uma técnica de simulação capaz de quantificar e avaliar a qualidade da cobertura. Um mecanismo numérico apropriado para comparar a cobertura de satélites e constelações. (LARSON, 1999)

Uma das ferramentas mais utilizadas nesta categoria é o Satellite Tool Kit (STK), desenvolvido pela Analytical Graphics, que fornece uma capacidade básica de simulação e uma variedade de módulos adicionais para geração de animação, determinação e propagação de órbita, análise de cobertura e programação de missões. (STK, 2017)

As principais simulações de Figuras de Mérito, via software STK, para este trabalho são: Área de cobertura, Número de acessos, Qualidade de imagem e Porcentagem de cobertura.

- *Área de cobertura.* Um objetivo de definição de cobertura é definido selecionando a(s) área(s) de interesse, identificando os satélites ativos que podem fornecer cobertura a essas áreas e definindo o período de tempo durante o qual as estatísticas de cobertura devem ser analisadas. Uma vez definido o alvo de cobertura, os períodos de acesso à área de cobertura podem ser calculados para determinar a disponibilidade de

um satélite ativo ou conjunto de satélites ativos que satisfaçam todas as restrições geométricas, de iluminação, temporais e outras especificadas pelo usuário (STK, 2017).

- *Número de acessos.* O número de acessos se dá pela quantidade de vezes que o satélite passa pelo mesmo alvo de cobertura. Finaliza o número de acessos quando está completa a cobertura do alvo (STK, 2017).
- *Qualidade de imagem.* Qualidade de imagem é definida pela distância mínima da amostra do solo nas unidades de medida. A Distância de amostra do solo é o menor tamanho de um objeto no solo que pode ser detectado pelo sensor (STK, 2017).
- *Porcentagem de cobertura.* É a porcentagem da área da grade de cobertura total que é coberta no tempo relatado (STK, 2017).

Ou seja, a região coberta pelo satélite sobre área total:

$$\text{porcentagem de cobertura} = \frac{\text{área coberta}}{\text{área total}} \times 100. \quad (2.33)$$

## 2.8 Missões espaciais

Nesta seção serão abordados os segmentos espaciais com sensores adequados ao monitoramento do desmatamento da amazônia.

### 2.8.1 CBERS-4

CBERS-4 (da série Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres) é um satélite de observação da Terra, resultado de um acordo sino-brasileiro e tecnicamente é uma evolução ao seu antecessor, o CBERS-2 (INPE, 2018).

O CBERS-3 foi lançado em 09 de dezembro de 2013, mas devido a uma falha ocorrida com o veículo lançador Longa Marcha 4B, o satélite não foi colocado na órbita prevista, resultando em sua reentrada na atmosfera da Terra. Após a falha do lançamento, Brasil e China decidiram antecipar o lançamento do CBERS-4 em um ano, sendo lançado em 07 de dezembro de 2014 com sucesso da base de Taiyuan, localizada a 700 km de Pequim. (EMBRAPA, 2019)

Sua órbita polar, Sol-síncrona está em uma altitude de 778 km da superfície da terra. com uma inclinação de 98.45° e tempo de revisita de 26 dias. Seu nó descendente está 10 : 30 a hora local do sol.

Os instrumentos utilizados pelos CBERS são (INPE, 2018):



Figura 19 – Satélite CBERS 4 (INPE, 2018)

1. Câmera MUX: câmera multiespectral com 3 bandas no visível (VIS) e 1 no infravermelho próximo (NIR), de 20 m de resolução, 120 km de faixa imageada e revisita de 26 dias.
2. Câmera IRS: escâner multiespectral infravermelho com 1 banda NIR, 2 bandas infra-vermelho de onda média (SWIR) e 1 banda no infravermelho termal, 40 m de resolução (80 m para o termal), 120 km de faixa imageada e revisita de 26 dias.
3. Câmera WFI: câmera de campo largo com 3 bandas no VIS e 1 banda no NIR, com 64 m de resolução, 720 km de faixa imageada e revisita de até 5 dias.
4. Câmera PAN: câmera pancromática e multiespectral com 4 bandas (3 VIS e 1 NIR) e resolução de 10 m (Modo multiespectral), e com 5 m de resolução (no modo pancromático); 60 km de faixa imageada e revisita de 52 dias ou de até 3 dias usando espelho de visada lateral.

Os vários instrumentos do CBERS fazem do satélite um dos mais apropriados ao monitoramento florestal e agrícola em escala global. Aplicações incluem: detecção e monitoramento do desmatamento, degradação florestal e corte seletivo, dinâmica de uso da terra, aspectos fitossanitários, previsão de safras, suporte a estatísticas agrícolas, adequação a legislação ambiental e suporte ao cadastro de propriedades rurais (INPE, 2018).

### 2.8.2 ALOS-2/PALSAR-2

O ALOS-2 (*Advanced Land Observing Satellite-2*) é uma missão de continuação do ALOS. A ALOS contribuiu para a cartografia, observação regional, monitoramento de desastres e pesquisas de recursos. O ALOS-2 (Figura 20) foi lançado pelo veículo de lançamento H-IIA em 24 de maio de 2014. (JAXA, 2019a)

A JAXA (2019a) conduziu atividades de pesquisa e desenvolvimento para o ALOS-2 para melhorar as tecnologias de observação amplas e de alta resolução desenvolvidas para o ALOS, a fim de satisfazer as necessidades sociais. Essas necessidades sociais incluem:

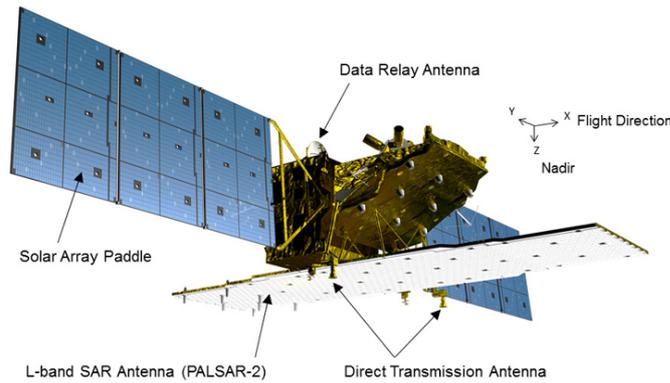


Figura 20 – Satélite ALOS-2. (JAXA, 2019a)

1. Monitoramento de desastres de áreas danificadas, com detalhes consideráveis e quando essas áreas podem ser grandes
2. Atualização contínua de arquivos de dados relacionados a informações nacionais sobre terra e infra-estrutura
3. Monitoramento eficaz de áreas cultivadas
4. Monitoramento global de florestas tropicais para identificar dissipadores de carbono.

Sua órbita polar Sol-síncrona está em uma altitude de 628 km do superfície terrestre. Com uma inclinação de  $97.9^\circ$  e tempo de revisita de 14 dias. Seu nó descendente está  $12 : 00 \pm 15\text{min}$  a hora local do sol.

O instrumento PALSAR-2 possui três modos de observação: Stripmap, ScanSAR e Spotlight, como apresentado na Figura 21. As especificações do sensor PALSAR-2 são apresentadas na Tabela 1.

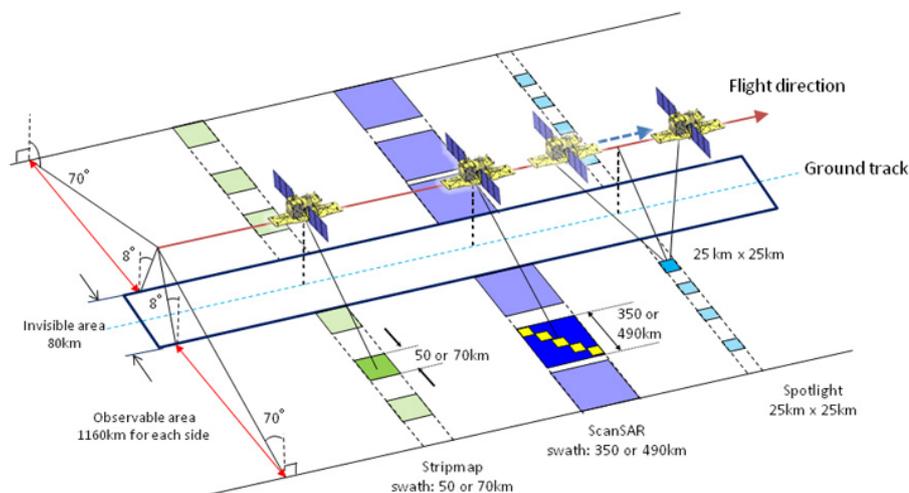


Figura 21 – Modos de observação do PALSAR-2. (JAXA, 2019b)

Tabela 1 – Especificações do sensor SAR. SAR Handbook (2019)

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| Sensor                                | PALSAR-2   |
| Ciclo de vida                         | 5 anos   |
| Frequência/<br>Comprimento<br>de onda | Banda L<br>$\lambda = 24.6 \text{ cm}$                                 |
| Polarização                           | Single: HH, VV<br>Dual: HH/HV, VV/VH<br>Quad: HH/HV/VH/VV              |
| Resolução                             | Spotlight: 1x3m<br>Stripmap: 3-10m<br>ScanSAR: 25-100m                 |
| Swath                                 | Spotlight: 25x25km<br>Stripmap:<br>55x70-70x70km<br>ScanSAR: 355x355km |
| Tempo de<br>revisita                  | 14 dias  |
| Acesso à<br>informação                | Comercial; proposta<br>científica limitada                             |



## 3 Metodologia

Neste capítulo serão apresentadas os parâmetros orbitais do satélite Óptico e SAR e design dos parâmetros do sensor Óptico e SAR.

### 3.1 Parâmetros Orbitais

Para esse trabalho de conclusão de curso, será utilizado a órbita Sol-síncrona para ambos os satélites.

A aplicação de satélites para a observação do desmatamento da amazônia requer um tempo de revisita mensal e média resolução temporal, devido ao desmatamento ser um processo a longo prazo e apresenta significativas mudanças após meses.

Considerando esses fatores, será utilizado um tempo de revisita de 10 dias como parâmetro para os satélites Óptico e SAR.

#### 3.1.1 Parâmetros orbitais do satélite Óptico

Para o satélite Óptico, foram pré-definidos três condições antes de definir os parâmetros orbitais preliminares.

A primeira condição para seleção da altitude, tem uma relação direta com o número de revoluções por dia, que foi definida 14,1 revoluções por dia. A altitude que opera com esse número de revoluções, está à 860,499 km em relação a superfície terrestre.

A segunda definição está relacionada com as condições de iluminação da amazônia para os sensores ópticos, que foi definido o horário local para cobertura de 10h30 do nodo descendente (Figura 22, esquerda).

Como o sensor óptico só pode operar durante o dia, devido a necessidade de incidência solar, seria necessária um número de revoluções grande o suficientemente para cobrir toda a superfície da amazônia em 10 dias. Ou seja, número de rotações para repetir no ciclo de 10 dias, que foi definido como 353 rotações. Isso significa que o satélite encerra um ciclo de 10 dias após 353 rotações. Estabelecido as condições, os parâmetros orbitais preliminares do satélite óptico são apresentados na Tabela 2.

#### 3.1.2 Parâmetros orbitais do satélite SAR

Para o satélite SAR foi definido 14,3 revoluções por dia, com uma altitude de 785,944 km.

Tabela 2 – Parâmetros orbitais do satélite óptico

| Satélite Óptico             |             |
|-----------------------------|-------------|
| <b>Parâmetros orbitais</b>  |             |
| <b>Semi-eixo maior (km)</b> | 7238,85     |
| <b>Excentricidade</b>       | 3,42714e-15 |
| <b>Inclinação</b>           | 98,8674°    |
| <b>Argumento do perigeu</b> | 0°          |
| <b>RAAN</b>                 | 49,7039°    |
| <b>Anomalia verdadeira</b>  | 30°         |

Para o satélite SAR que possui um sensor que exige muita potência e não necessita de luz solar para cobertura, sua SSO possui um plano orbital perpendicular à direção do sol, o que definiu o horário local do nodo descendente de 06:00. O que lhe permite sempre radiação solar para o painéis solares (Figura 22, direita). Os parâmetros orbitais do satélite SAR são apresentados na Tabela 6.

Tabela 3 – Parâmetros orbitais do satélite SAR

| Satélite SAR                |          |
|-----------------------------|----------|
| <b>Parâmetros orbitais</b>  |          |
| <b>Semi-eixo maior(km)</b>  | 7164,26  |
| <b>Excentricidade</b>       | 0        |
| <b>Inclinação</b>           | 98,5494° |
| <b>Argumento do perigeu</b> | 0°       |
| <b>RAAN</b>                 | 342,019° |
| <b>Anomalia verdadeira</b>  | 180°     |

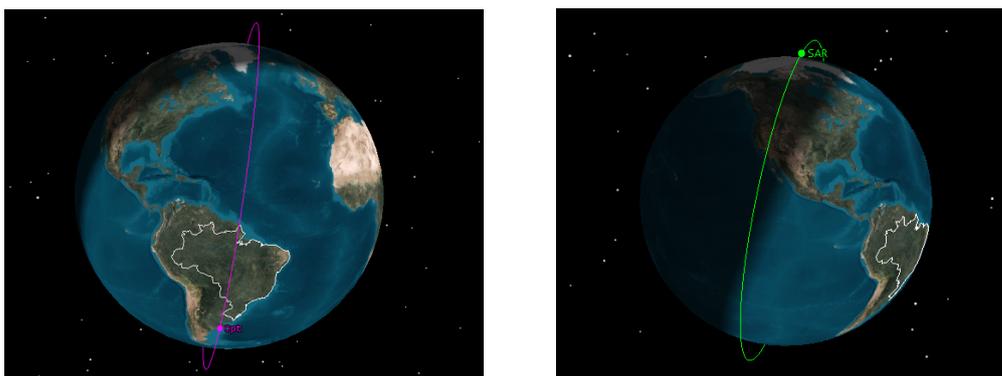


Figura 22 – Visualização das orbitas pelo STK. Da esquerda para direita, o satélite Óptico e o satélite SAR

### 3.2 Parâmetros do Sensor de Observação

Nesta seção serão apresentadas os parâmetros dos sensores ópticos e SAR.

### 3.2.1 Design do sensor Óptico

#### 3.2.1.1 Bandas de operação

Para missão de monitoramento do desmatamento da amazônia, as bandas de operação do sensor óptico escolhidas são:

- Faixa de luz vermelha (0,6 - 0,7  $\mu\text{m}$ )
- Faixa do infravermelho próximo NIR (0,7 - 0,9  $\mu\text{m}$ ).

O motivo de escolha das duas bandas é devido a baixa reflectância na faixa do vermelho ( $< 10\%$ ), da vegetação enquanto no NIR possui uma alta reflectância (entre 30% a 70%). Com as duas bandas é possível distinguir a vegetação nas imagens.

o resultado da relação das duas bandas é uma imagem monocromática, com a gradação de tons de cinza indicando a variação da biomassa ou o índice de área foliar. Quanto mais claro o tom de cinza, maior a densidade de vegetação. Tons de cinzas médios indicam pouca vegetação e tons de cinza totalmente escuros indicam ausência de vegetação. (MENESES, 2012)

o índice de vegetação pode ser calculado pelo método NDVI (*Normalize Difference Vegetation Index*), que envolve a diferença e a soma entre estas duas bandas do NIR e do vermelho, segundo a razão (CAMPBELL, 1944-):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}. \quad (3.1)$$

#### 3.2.1.2 Parâmetros de resolução espacial

Para definição dos parâmetros do sensor óptico, primeiramente o sensor tem os seguintes pré-requisitos:

- Resolução de solo de 10 metros
- Ângulo de campo de visada:  $\pm 28,6^\circ$
- Tamanho do detector: 30  $\mu\text{m}$

A partir desses valores, seguindo o processo de design na sessão 2.6.4, são definidos os seguintes parâmetros, como apresenta a Figura 23 (superior):

Tabela 4 – Parâmetros do sensor óptico

| Satélite Óptico          |  |
|--------------------------|--|
| Parâmetros do sensor     |  |
| <b>Bandas Espectrais</b> | (R) 0,6 - 0,7 $\mu\text{m}$ /(NIR) 0,7 - 0,9 $\mu\text{m}$ |
| <b>Resolução</b>         | 10 m   |
| <b>Quantização</b>       | 8 bits   |
| <b>Abertura relativa</b> | 0,13538  |
| <b>Distância focal</b>   | 2,58 m   |
| <b>Tamanho</b>           | 0,20 m x 0,14 m diâmetro                                   |
| <b>Peso</b>              | 4 kg   |
| <b>Potência</b>          | 4,5 W  |
| <b>Taxa de dados, DR</b> | 219 Mbits/s  |

### 3.2.2 Design do sensor SAR

#### 3.2.2.1 Características do SAR

Para uma boa resolução, o satélite embarcando um sistema RADAR, só é possível com por meio de Radar de abertura sintética (SAR).

Seguindo o modelo de satélites para monitoramento de biomassa e as características apresentadas na sessão 2.7.7, a melhor banda de operação é a banda L, com comprimento de onda  $\lambda = 24,6$  cm, devido ao seu potencial de penetração na vegetação. A polarização é outro fator que deve ser considerado, visto que a polarização cruzada do tipo dipolo (VH/HV) tem uma melhor visualização de retro-espalhamento para monitoramento de biomassa.

Outro fator é a limitação do ângulo de incidência do feixe do sensor SAR. Diferente do sensor óptico, que possui o ângulo central de varredura no nadir, para o sensor SAR são necessárias vários modos de feixes (*beam mode*) com diferentes ângulos de incidência máximo e mínimo. Baseando nos modos de feixe ScanSAR do satélite TerraSAR-X, foram selecionadas três modos de incidência que são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – modos de feixe para o sensor SAR

| Feixe de Elevação | $\theta_{min}$ | $\theta_{max}$ |
|-------------------|----------------|----------------|
| <b>SAR-001</b>    | 19,710°        | 30,237°        |
| <b>SAR-002</b>    | 27,195°        | 36,595°        |
| <b>SAR-003</b>    | 35,961°        | 43,881°        |

A partir desse valores, seguindo o processo de design na sessão 2.6.4, baseando-se na Tabela do Apêndice 36, são definidos o seguintes parâmetros preliminares do sensor SAR, como apresenta a Figura 23 (inferior):

Tabela 6 – Parâmetros do sensor SAR

| Satélite SAR                |  |
|-----------------------------|--|
| <b>Parâmetros do sensor</b> |  |
| <b>Bandas Espectrais</b>    | Banda-L ( $\lambda = 24,6$ cm)         |
| <b>Resolução</b>            | <i>near</i> = 10 m / <i>far</i> = 16 m |
| <b>Largura da Antena</b>    | 3 m                                    |
| <b>Abertura relativa</b>    | 1,07                                   |
| <b>Tamanho</b>              | 3 m x 4 m x 1,5 m                      |
| <b>Peso</b>                 | 990 kg                                 |
| <b>Potência</b>             | 3675 W                                 |

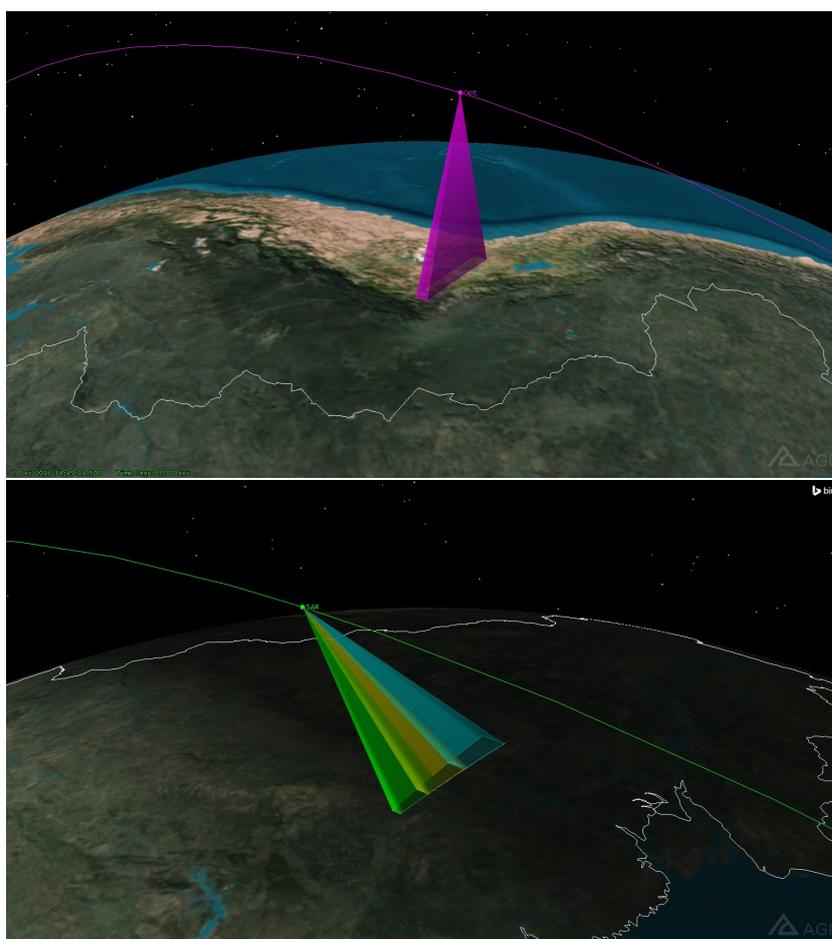


Figura 23 – Visualização dos sensores pelo STK. O sensor Óptico, na Figura superior e abaixo o sensor SAR, com os três *beam mode*

### 3.3 Definindo área de cobertura - Amazônia Legal

De acordo com mapa da amazônia Legal em anexo e com auxílio do Software STK, o primeiro passo é estabelecer as coordenadas de contorno que limitam a amazônia legal. A área de amazônia legal definida para análise pelo software STK possui 4.543,950 km<sup>2</sup>.

Outro fator importante para análise são as grades ou pontos granulação, que tem como função de malha para uma análise mais refinada. Elas são distribuídas em coordena-



Figura 24 – Área de cobertura - Amazônia Legal

das (latitude/longitude) com uma distância entre elas de  $0,5^\circ$ . As grades são apresentadas pelos pontos na Figura 24.

## 4 Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados resultados apresentados foram efetuados pelo software STK. Com base nos resultados, uma discussão e comparação entre missões estabelecidas.

### 4.1 Porcentagem de cobertura

Feito uma análise separadamente para as duas missões definidas por este trabalho de conclusão, todas elas apresentaram uma porcentagem de cobertura satisfatória de 100%, pelo software STK.

Para uma análise temporal do dia 3 de dezembro ao dia 10 de dezembro de 2018, foram obtidas as seguinte a porcentagens acúmulo de cobertura de cada satélite:

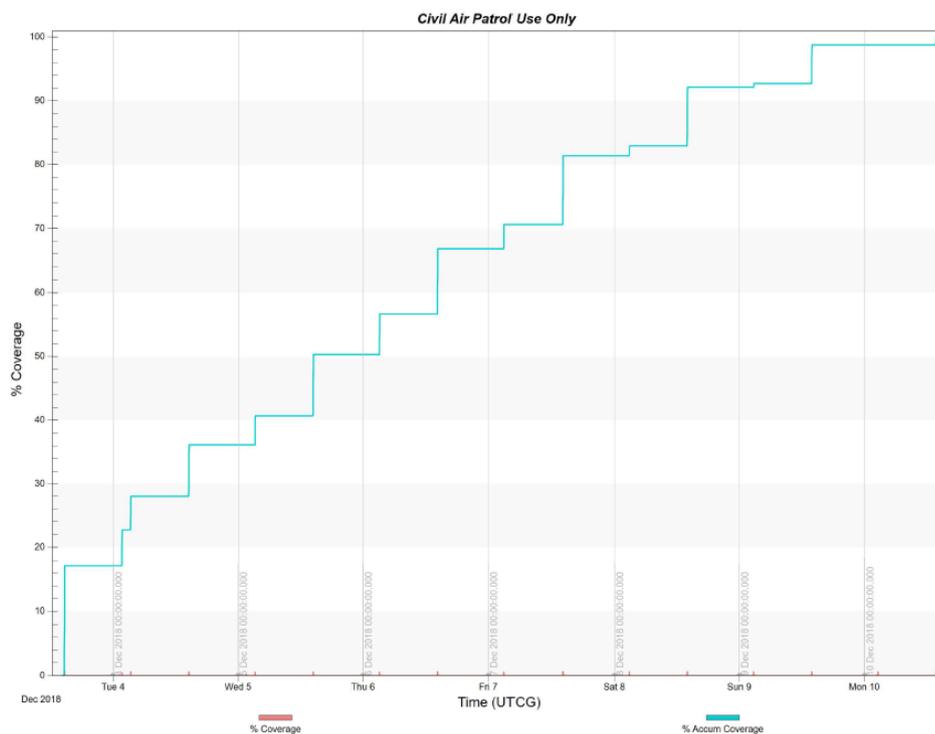


Figura 25 – Porcentagem de cobertura no intervalos de dias do satélite Óptico

Para o satélite Óptico, é notável uma cobertura com crescimento linear, devido ao seu grande numero de rotações até o fim do ciclo. O software STK apresentou um tempo de cobertura completa de 7 dias, com 100% de cobertura no dia 10 de dezembro, como apresentada a Figura 25. Enquanto o satélite SAR obteve um tempo de cobertura de 6 dias, como apresenta a Figura 26, com 100% de cobertura no dia 9 de dezembro.

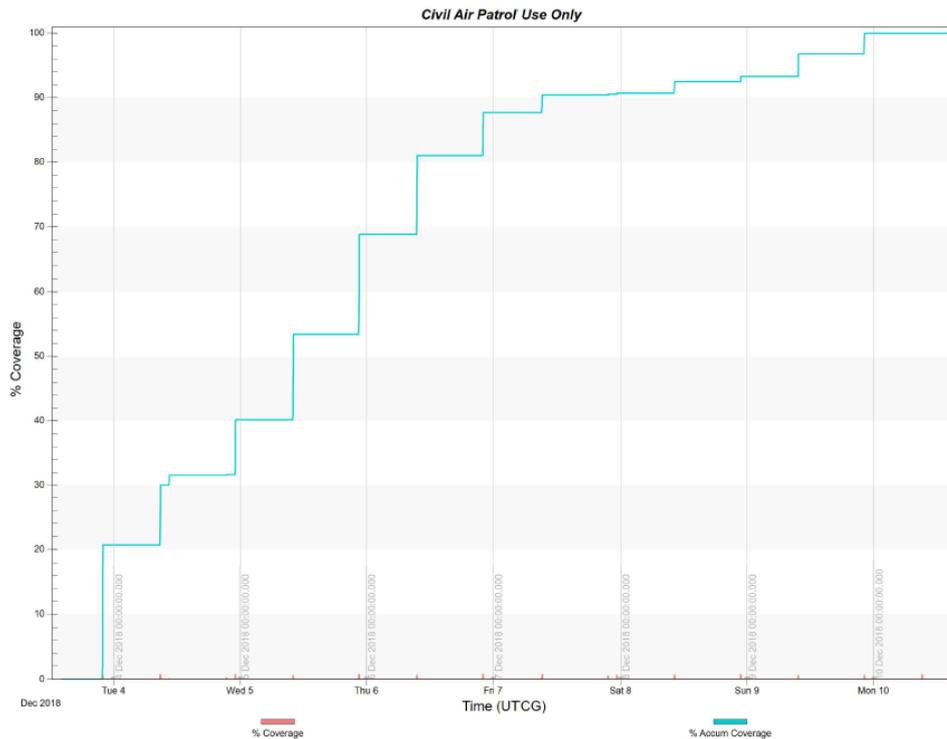


Figura 26 – Porcentagem de cobertura no intervalos de dias do satélite SAR

## 4.2 Número de Acessos

O número de acessos está definido no intervalo de tempo para cobrir a área total da amazônia. Considerando o intervalo de tempo de acúmulo de cobertura separadamente para cada satélite, foram obtidas as análises estáticas e discussões do número de acessos:

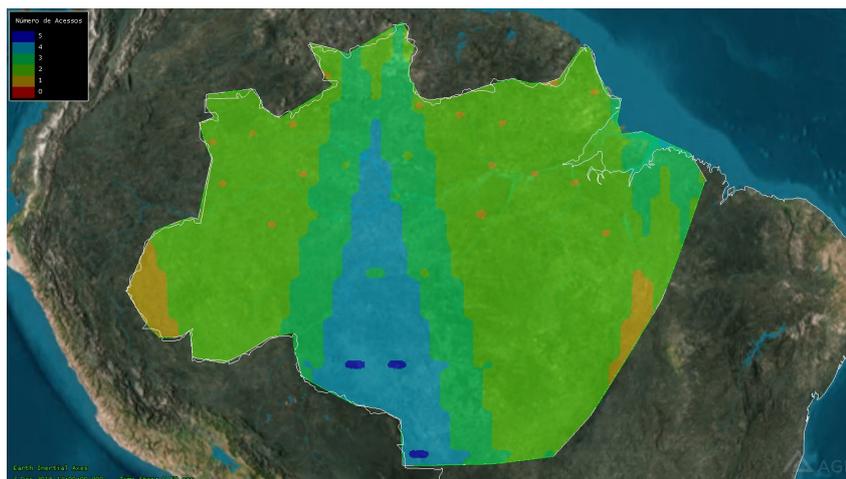


Figura 27 – Análise estática de número de acessos do satélite Óptico

Analisando graficamente a projeção do satélite Óptico (Figura 27), a região central da amazônia legal possuem entre 3 e 4 acessos. No estado do Pará e a oeste do estado do Amazonas obteve um número de 2 acessos. Somente na parte leste do Estado do Acre e

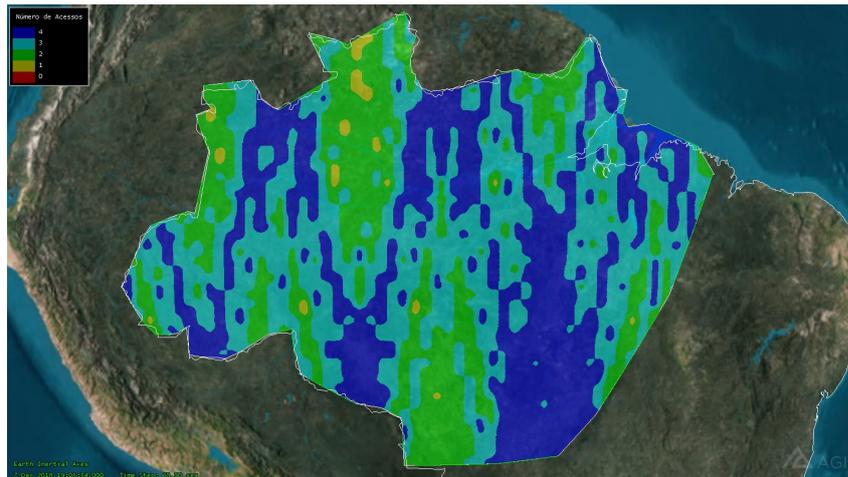


Figura 28 – Análise estática de número de acessos do satélite SAR

parte do Tocantins obteve 1 acesso.

Já análise gráfica para o satélite SAR (Figura 28), foi um pouco mais diversa, comparado à projeção do satélite Óptico, onde regiões como estado do Pará, obteve entre 3 e 4 acessos, enquanto no estado do Amazonas, obteve de 2 a 4 acessos.

| Número de acessos |                   |                   |                  |
|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| Satélites         | Mínimo de acessos | Máximo de acessos | Média de acessos |
| Satélite Óptico   | 1                 | 5                 | 2,446888         |
| Satélite SAR      | 1                 | 6                 | 3,151824         |

Tabela 7 – Comparação de número de acessos para cada satélite

Os valores apresentados pela ferramenta *Figure of Merit* pela Tabela 7, é notável que os números de acessos foram maiores para o satélite SAR. O motivo é que para o satélite Óptico, os acessos eram somente realizados durante o dia, o que não é uma condição necessária para o satélite SAR. Por consequência, o satélite SAR tem um tempo de revisita menor em comparação ao Óptico.

### 4.3 Tempo de Cobertura

O tempo de cobertura para cada ponto de grade, considerando o tempo em segundos, foram obtidos as análises estáticas e discussões para cada satélite:

Considerando a análise estática anterior de número de acessos, para análise de tempo de cobertura do satélite Óptico (Figura 29), a mesma região central da amazônia legal que obteve um número de acessos entre 3 e 4, apresentou um tempo de cobertura aproximadamente entre 21 e 37 segundos. Nas regiões que se obteve 2 acessos, apresentou um tempo de cobertura aproximadamente entre 9 e 21 segundos. Nas regiões que se obteve 1 acesso, apresentaram somente um tempo de cobertura aproximadamente de 9 segundos.

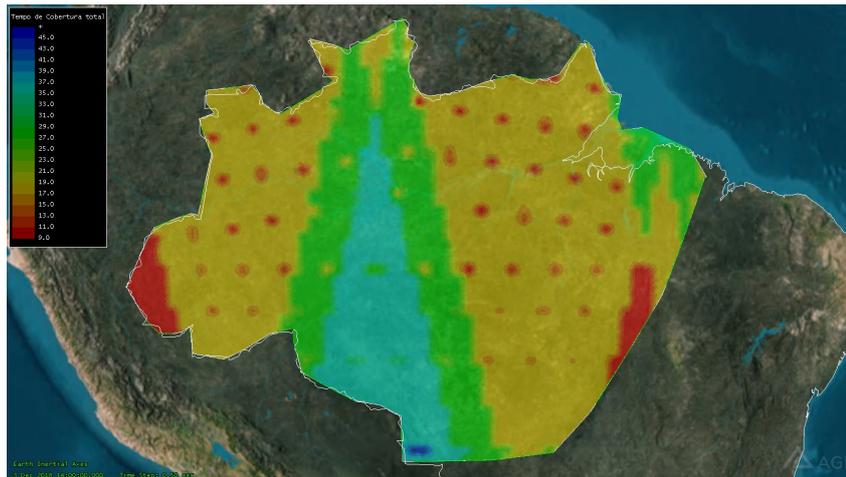


Figura 29 – Análise estática de tempo de cobertura do satélite Óptico

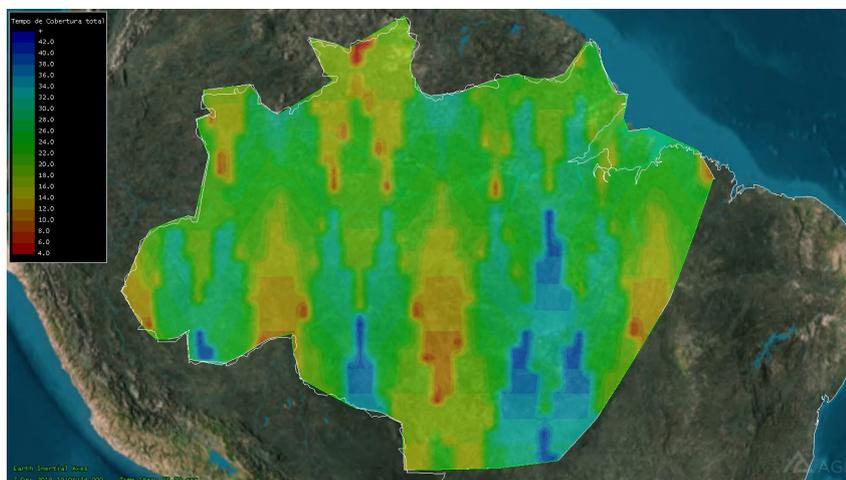


Figura 30 – Análise estática de tempo de cobertura do satélite SAR

Para o satélite SAR (Figura 30), analisando graficamente, pode-se observar um tempo de cobertura um pouco mais homogêneo, onde grande parte do Estado do Pará e Amazonas apresentaram um tempo de cobertura médio de aproximadamente 24 segundos.

| Tempo de cobertura(segundos) |              |              |             |
|------------------------------|--------------|--------------|-------------|
| Satélites                    | Tempo mínimo | Tempo máximo | Tempo médio |
| Satélite óptico              | 9,098814     | 43,254388    | 22,087511   |
| Satélite SAR                 | 4,669957     | 41,420750    | 23,173311   |

Tabela 8 – Comparação do tempo de cobertura de cada satélite

Para ambas as missões, de acordo a tabela 8, o tempo de cobertura foram satisfatórios. Devido ao maior número de acessos para o satélite SAR, o seu tempo de cobertura foi mais homogêneo comparado ao satélite Óptico. Porém, o tempo mínimo de cobertura em alguns pontos da amazônia foram menores de 4 segundos, para o SAR, enquanto o tempo mínimo do Óptico foi de 9 segundos, para regiões de 1 acesso. Onde o Óptico

obteve melhor desempenho.

## 4.4 Qualidade de Cobertura

A análise de qualidade de cobertura ou amostra de solo, tem grande importância para este trabalho de conclusão de curso pois, para análises de desmatamento. A qualidade de imagem é relevante para identificar por meio da resolução temporal, o crescimento de desmatamento na amazônia legal.

Com auxílio da ferramenta *Figure of Merit*, foram obtidos as análises de qualidade de cobertura estáticas e discussões para cada satélite:



Figura 31 – Análise estática de amostra de solo do satélite Óptico

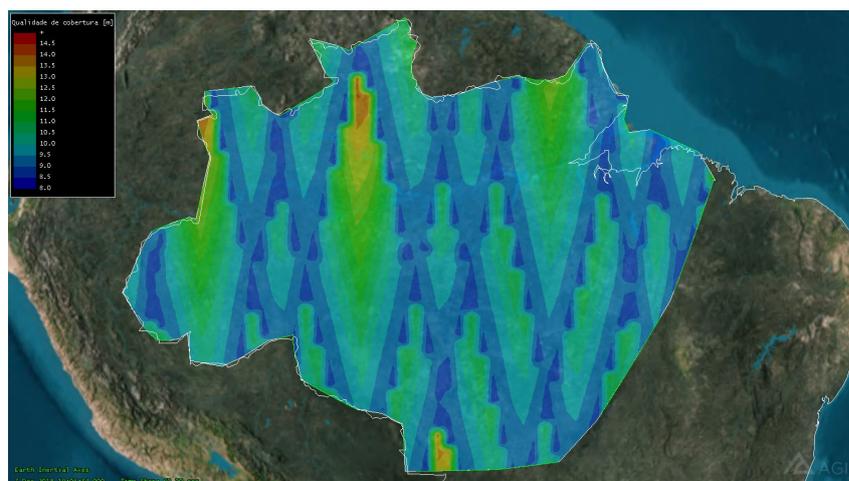


Figura 32 – Análise estática de amostra de solo do satélite SAR

A análise estática apresentada na Figura 31 possui uma amostra de solo bem homogênea em toda a amazônia legal. Considerando a distância focal do sensor óptico,

obteve-se uma resolução de 10 metros com pequenas variações, de acordo com os parâmetros estabelecidos para missão.

Já o satélite SAR apresentou uma análise com maiores variações de amostra de solo (Figura 32). O motivo está relacionado com ângulos de incidência máximos e mínimos de cada feixe. A resolução é melhor no *near range* comparado ao *far range*. Isso é devido a maior distância do solo até sensor no *far range*, o que resulta uma amostra de solo de baixa resolução.

| Qualidade de cobertura (metros) |                  |                  |                 |
|---------------------------------|------------------|------------------|-----------------|
| Satélites                       | Distância mínima | Distância máxima | Distância média |
| Satélite óptico                 | 10,008312        | 10,468726        | 10,064447       |
| Satélite SAR                    | 8,750009         | 14,402950        | 9,823770        |

Tabela 9 – Comparação da Qualidade de cobertura de cada satélite

Para ambas as missões, os valores apresentados na Tabela 9 foram satisfatórios, até mesmo para o satélite SAR, levando em consideração que as distâncias médias estão dentro do limite esperado, definida em 10 metros. O que de fato são resultados favoráveis para análise de desmatamento, atendendo toda a região amazônica.

## 5 Conclusão

Os resultados preliminares do estudo realizado para este trabalho de conclusão de curso indicaram que a maioria dos requerimentos para a missão de monitoramento da floresta amazônica podem ser atendidos através de dois satélites, Óptico e SAR, compostos por pelos seus respectivos sensores, nas bandas espectrais: RED e NIR; Banda - L. Tanto o satélite com sensor óptico como também satélite SAR são essenciais para esse tipo de missão. Um dos fatores que deve levar em consideração no projeto é o clima, por se tratar de uma região com um dos maiores índices de chuva no mundo. Por isso os satélite SAR tem importância para ajudar na correção onde os satélites ópticos não tem visibilidade. Considerando todos os parâmetros de cada satélite e estudos realizados durante este trabalho, o SAR, na Banda-L tem o melhor desempenho, para monitoramento da Floresta Amazônica, pela facilidade de penetração e maior aquisição de dados. O que resulta uma análise temporal mais detalhada e também mais precisa de informações, que o satélite Óptico.

Dimensionar os sensores é uma tarefa difícil, requer muitos parâmetros, porém possível. Para um projeto de um segmento espacial, deve ser considerado os outros subsistemas da carga útil. O que representa um impacto direto nos parâmetros do sensor e no projeto final. Definido o tipo de carga útil final e os requisitos básicos de desempenho, o design final poderá ser iniciado. O que pode envolver a decisão de adquirir ou fabricar o sensor do satélite.

Nessa análise preliminar de dois satélites, mostra que as missões são viáveis, mas desafiadoras. Vários refinamentos e iterações no design têm o potencial de resultar em um conceito de carga útil viável e econômico.

### 5.1 Missões futuras

Para melhor ilustrar o ponto final de tal processos, duas missões em estado da arte, designadas para monitoramento florestal que são elas: Amazonia-1 e Tandem-L. Um satélite Óptico e um SAR, respectivamente.

#### 5.1.1 Amazonia-1

A Missão Amazonia irá fornecer dados (imagens) de sensoriamento remoto para observar e monitorar o desmatamento especialmente na região amazônica e, também, a diversificada agricultura em todo o território nacional com uma alta taxa de revisita, buscando atuar em sinergia com os programas ambientais existentes (Figura 33).

Os dados gerados serão úteis para atender, ainda, outras aplicações correlatas, tais como: monitoramento da região costeira, reservatórios de água, florestas naturais e cultivadas, desastres ambientais, entre outros.

Os dados estarão disponíveis tanto para comunidade científica e órgãos governamentais quanto para usuários interessados em uma melhor compreensão do ambiente terrestre.

A Missão prevê três satélites de sensoriamento remoto: Amazonia-1, Amazonia-1B e Amazonia-2, estando o primeiro em fase final de desenvolvimento.

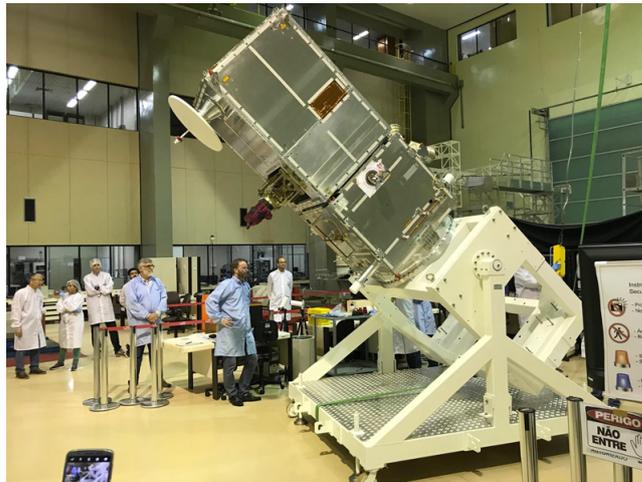


Figura 33 – Amazônia-1 realizando testes estruturais. (ESPACIAIS, 2019)

O imageador do Amazonia-1 é um modelo da Câmera WFI utilizado no Programa CBERS, portanto, um equipamento já com herança em voo (Figura 34. A WFI (Câmera de Campo Largo) tem a propriedade de fazer rápidas revisitas a certa área – em geral em menos de cinco dias.

O Amazonia-1 possui uma massa de cerca de 640 kg, e será colocado em uma órbita com altitude média de 752 km. O lançamento do Amazonia-1 ocorrerá da Índia, em 2020, pelo lançador PSLV da ISRO.

### 5.1.2 Tandem-L

Segundo DLR (2019), o Tandem-L é uma proposta para uma missão de satélite altamente inovadora para a observação global de processos dinâmicos na superfície da Terra com qualidade e resolução até agora desconhecidas. Graças às novas técnicas de imagem e à vasta capacidade de gravação, a Tandem-L fornecerá informações urgentemente necessárias para solucionar questões científicas urgentes nas áreas da biosfera, geosfera, criosfera e hidrosfera.

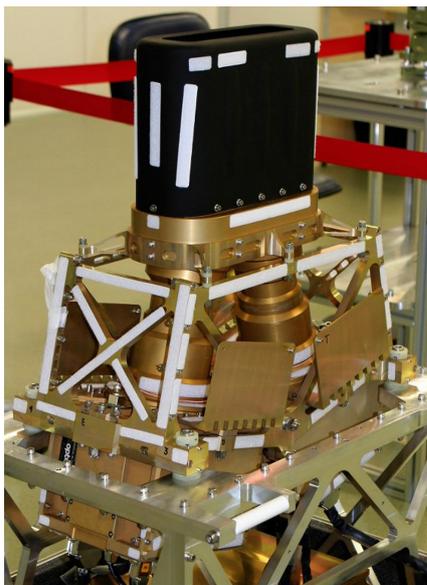


Figura 34 – sensor WFI, embarcado no amazonia-1. (ESPACIAIS, 2019)



Figura 35 – Tandem-L: uma missão de radar altamente inovadora

O conceito de missão Tandem-L é baseado no uso de dois satélites de radar operando em banda L (comprimento de onda de 24 cm). Os instrumentos apresentam um swath de 350 km a uma resolução de 7 m. Além disso, o modo de alta resolução com resolução no azimute de 1 m com swath de 50 km.

Os fabricantes estabeleceram as metas para missão:

- A medição global da biomassa florestal e sua dinâmica para uma melhor compreensão do ciclo do carbono,

- o registo sistemático de deformações da superfície da Terra com precisão milimétrica para a investigação e análise de risco sísmicas,
- a medição à escala fina da umidade da superfície para a investigação do ciclo da água,
- a quantificação de mudanças glaciais e processos de fusão nas regiões polares para melhores previsões do aumento do nível do mar.

Uma contribuição importante e única do Tandem-L reside no mapeamento da complexidade e diversidade das estruturas verticais da floresta, bem como sua variação. (DLR, 2019)

O ponto chave da missão é que a Tandem-L será pioneira em métodos e tecnologias de sensoriamento remoto para construir sistemas de monitoramento para apoiar a implementação e verificação de políticas ambientais. (DLR, 2019)

A missão encontra-se em fase de especificação e construção, com data de lançamento marcada para 2022, pelo lançador Falcon-9.

# Referências

- AB'SABER, A. N. Amazonia - heaven of a new world. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1998. Citado na página 25.
- BOAIN, R. J. A-b-cs of sun synchronous orbit mission design. *Proceedings of 14th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Conference*, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 59.
- BRASIL, M. d. M. A. Estratégia do programa nacional de monitoramento ambiental dos biomas brasileiros. Departamento de Políticas de Combate ao Desmatamento Brasília: MMA, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 23, 25 e 26.
- CAMPBELL, J. B. *Introduction to remote sensing*. [S.l.]: A Division of Guilford Publications, Inc. — 5th ed., 1944—. Citado 7 vezes nas páginas 13, 26, 30, 32, 36, 38 e 67.
- CICCOLELLA, A. Mission analysis aspects for earth observations missions. ESA, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 57, 58 e 59.
- DABROWSKA WANDA KOWALIK, V. H. K. Study on sar potential for direct biomass assessment. GEONARDO Environmental Technologies Ltd., 2009. Citado 4 vezes nas páginas 13, 51, 54 e 55.
- DLR. *Tandem-L:Satellite Mission Proposal for Monitoring Dynamic Processes on the Earth's Surface*. 2019. Disponível em: <<https://www.dlr.de/dlr/en/Portaldata/1/Resources/documents/2016/Tandem-L-Brochure-2016-06.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 78 e 80.
- EMBRAPA. *CBERS - China-Brazil Earth Resources Satellite ou Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres*. 2019. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/cbers>>. Citado na página 60.
- ESPACIAIS, I. I. N. de P. *Missão Amazonia*. 2019. Disponível em: <<http://www3.inpe.br/amazonia-1/amazonia.php>>. Citado 3 vezes nas páginas 14, 78 e 79.
- FLORENZANO, T. G. *Imagens de Satélite para estudos ambientais*. [S.l.]: São Paulo : Oficinas de Textos, 2002. Citado na página 30.
- FLORES-ANDERSON KELSEY HERNDON, R. B. T. E. C. A. I. *The SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*. [S.l.]: SERVIR Global Science Coordination Office, 2019. Citado 12 vezes nas páginas 13, 15, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 57 e 63.
- FRANCA, R. R. da. Eventos pluviiais extremos na amazônia meridional: riscos e impactos em rondônia. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-graduação em Geografia, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- GONZÁLEZ MARCELLO JAVIER RUIZ, F. M. A. F. E. *Tutorial do Sensoriamento remoto - TELECAN*. [S.l.]: Universidade de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), 2013. Citado 3 vezes nas páginas 39, 41 e 42.

- IBGE. *Amazônia Legal*. 2018. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geografia/amazonialegal.shtm?c=2>>. Citado na página 25.
- INPE. *CBERS 3 e 4*. 2018. Disponível em: <<http://www.cbers.inpe.br/sobre/cbers3-4.php>>. Citado 3 vezes nas páginas 13, 60 e 61.
- JAXA. *ALOS-2 Project / ALOS-2 Overview*. 2019. Disponível em: <<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/en/about/overview.htm>>. Citado 3 vezes nas páginas 13, 61 e 62.
- JAXA. *ALOS-2 Project / PALSAR-2*. 2019. Disponível em: <<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/en/about/palsar2.htm>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 62.
- LARSON, J. R. W. W. J. *Space Mission Analysis and Design*. [S.l.]: Microcosm - 3rd edition, 1999. Citado 5 vezes nas páginas 14, 43, 44, 59 e 85.
- LIU., W. T. H. *Aplicações de sensoriamento remoto*. [S.l.]: Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2006. Citado na página 32.
- MAINI, A. K. *Satellite technology : principles and applications*. [S.l.]: Varsha Agrawal. – 2nd, 2010. Citado 11 vezes nas páginas 13, 26, 33, 34, 35, 37, 38, 45, 46, 57 e 58.
- MENESES, T. d. A. P. R. *Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto*. [S.l.]: Universidade de Brasília, 2012. Citado 14 vezes nas páginas 13, 28, 29, 31, 33, 34, 38, 39, 40, 42, 49, 50, 53 e 67.
- MMA. *PREVENÇÃO E CONTROLE DO DESMATAMENTO*. 2018. Disponível em: <<http://combateadesmatamento.mma.gov.br>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 26.
- NOVO, F. J. P. Evlyn Márcia Leão de M. *Introdução ao sensoriamento remoto*. INPE - São José dos Campos, 2001. Citado 9 vezes nas páginas 13, 28, 40, 45, 46, 47, 49, 50 e 51.
- RAVANBAKHS, S. F. A. *System engineering approach to initial design of leo remote sensing missions*. Institute for Experimental and Applied Physics (IEAP), University of Kiel, Kiel, Germany, 2013. Citado na página 58.
- SANTOS, A. R. dos. *Apostila de Sensoriamento Remoto*. [S.l.]: Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias. Departamento de Engenharia Rural, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 34.
- SOUZA, R. B. de. *Sensoriamento remoto: conceitos fundamentais e plataformas*. centro regional sul de pesquisas espaciais. INPE, 2010. Citado na página 27.
- STEFFEN, C. A. *Introdução ao Sensoriamento Remoto*. 2001. Disponível em: <<http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>>. Citado na página 42.
- STK, A. G. I. *STK Help*. [S.l.: s.n.], 2017. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 60.
- SULSOFT. *Guia do ENVI em português*. [S.l.]: ITT: Visual Information Solutions, 2004. Citado 7 vezes nas páginas 30, 32, 33, 39, 40, 41 e 45.

## Apêndices



# APÊNDICE A – Primeiro Apêndice

| Purpose                                       | Instrument Name  | Size<br>L x W x D<br>(m)                | Mass<br>(kg) | Avg.<br>Pwr.<br>at 28 V<br>(W) | Data<br>Rate<br>(Mbps)   | Aper-<br>ture<br>(m) | Pointing<br>Accu-<br>racy<br>(deg) |
|---|--|---|--------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------------------|
| <i>Solar<br/>Physics</i>                      | Lyman-Alpha Coronagraph                                  | 2.8 x 0.88 x 0.73                       | 250          | 87                             | 13.5                     | —                    | 0.003                              |
|   | X-ray Telescope Spectrom.                                | 2.7 x 1 dia.                            | 485          | 30                             | 0.4                      | —                    | 0.003                              |
|   | Solar Optical Telescope                                  | 7.3 x 3.8 dia.                          | 6,800        | 2,000                          | 50+                      | 1.25                 | —                                  |
|   | Solar Magnetic Velocity Field                            | 2 x 0.4 x 0.4                           | 183          | 322                            | 2+                       | —                    | 0.003                              |
|   | 100 m Pinhole Camera                                     | 1 x 1 x 2                               | 1,000        | 500                            | 0.5                      | —                    | —                                  |
|   | Extreme UV Telescope                                     | 2.78 x 0.86 x 0.254                     | 128          | 164                            | 1.28                     | —                    | —                                  |
| Solar Gamma Ray Spectrom.                     | 1 x 1 x 3  | 2,000                                   | 500          | 0.1                            | 140 cm <sup>2</sup>      | 0.003                |                                    |
| <i>Space<br/>Plasma<br/>Physics</i>           | Ion Mass Spectrometer                                    | 0.5 x 0.5 x 0.4                         | 80           | 334                            | 0.01                     | —                    | 1                                  |
|   | Beam Plasma  | 0.6 x 0.7 x 0.7 +<br>two 0.7 dia. ant.  | 17           | 38                             | 0.016                    | —                    | 5                                  |
|   | Plasma Diagnostics                                       | —                                       | 2,000        | 250                            | 50                       | —                    | —                                  |
|   | Doppler Imaging Interferom.<br>Proton (ion) Accelerators | (0.25) <sup>3</sup><br>6.7 x 3.4 x 3.10 | 100<br>500   | 620<br>1,500                   | 0.2<br>0.256<br>(4.2 TV) | —                    | —<br>1                             |
| <i>High<br/>Energy<br/>Astro-<br/>physics</i> | Gamma Ray Burst  | 2 x 4 dia.                              | 1,000        | 120                            | 0.01                     | 3                    | —                                  |
|   | Cosmic Ray Transition                                    | 3.7 x 2.7 dia.                          | 1,500        | 230                            | 0.10                     | 2.70                 | —                                  |
|   | X-ray Spectrom./Polarimeter                              | 1.6 x 1.6 x 3                           | 2,000        | 300                            | 0.03                     | —                    | 0.1                                |
|   | Short X-ray  | 1 x 1 x 3                               | 1,000        | 300                            | 0.025                    | 1 x 3                | 0.1                                |
|   | HI Energy Gamma Ray Tele.                                | 3 dia. x 4                              | 10,000       | 100                            | 0.003                    | 3                    | 0.1                                |
| <i>Resources</i>                              | Gravity Gradiometer                                      | 0.23 m sphere                           | 10           | 1                              | —                        | —                    | 1-2                                |
|   | Synthetic Aperture Radar                                 | 2.8 x 3.7 x 1.4                         | 808          | 3,000                          | 120                      | 8 x 2.8              | 2.5                                |
|   | Multi-Spectral Mid-IR                                    | 1.5 x 1 dia.                            | 800          | 900                            | 30                       | 1                    | 0.1                                |
|   | Thematic Mapper  | 2 x 0.7 x 0.9                           | 239          | 280                            | 85                       | 0.406                | 0.08                               |
| <i>Materials<br/>Processing</i>               | Materials Experiment Assem.                              | 1 x 1 x 2                               | 900          | 500                            | 0                        | —                    | —                                  |
|   | Solidification Experiment                                | —                                       | 1,100        | 3,000                          | 0.02                     | —                    | —                                  |
| <i>Life<br/>Sciences</i>                      | Life Science Lab Module                                  | 7 x 4 dia.                              | 6,800        | 8-25<br>kW                     | 1.0                      | —                    | —                                  |
| <i>Environ-<br/>mental</i>                    | Limb Scanning Radiometer                                 | 4.8 x 1.9 dia.                          | ~ 800        | 125                            | 0.52                     | —                    | —                                  |
|   | Microwave Radiometer                                     | 4 x 4 x 4                               | 325          | 470                            | 0.20                     | 4                    | ±0.1                               |
|   | Dual Frequency Scatterom.                                | 4.6 x 1.5 x 0.3                         | 150          | 200                            | 0.01                     | 4.6 x 0.3            | 1                                  |
|   | Ocean SAR  | 20 x 2 x 0.2                            | 250          | 300                            | 120                      | 20 x 2               | 0.1                                |
|   | Solar Spectrum   | 0.4 x 0.3 x 0.6                         | 16           | 60                             | Low                      | —                    | ±3                                 |
|   | Doppler Imager   | 1.25 x 0.6 x 0.8                        | 191          | 165                            | 20                       | —                    | ±3                                 |
|   | Photometric Imaging                                      | 1.4 x 1.4 x 0.5                         | 147          | 330                            | 0.01                     | —                    | ±1.5                               |
| <i>Comm.</i>                                  | TDRS Comm. Payload                                       | 2.5 x 2.5 x 1                           | 680          | 715                            | 300 (x2)<br>+ 50         | 4.8                  | ~ 0.3                              |
|   | DSCS III   | —                                       | 550          | 491                            | —                        | —                    | —                                  |

Figura 36 – Características de cargas típicas. (LARSON, 1999)