



MINISTÉRIO DA JUSTIÇA E SEGURANÇA PÚBLICA
POLÍCIA FEDERAL - DITEC - INC
SERVIÇO DE GEOMÁTICA - SEGeo/DITEC/PF

NOTA TÉCNICA Nº 2/2025-SEGeo/DITEC/PF

PROCESSO Nº 08059.000562/2024-75

INTERESSADO: SERVIÇO DE GEOMÁTICA - SEGeo/DITEC/PF, DIRETORIA TÉCNICO-CIENTÍFICA - DITEC/PF, MINISTÉRIO DA JUSTIÇA E SEGURANÇA PÚBLICA - MJSP

ANÁLISES DOS PARÂMETROS QUE CARACTERIZAM O IMAGEAMENTO POR PLATAFORMAS ORBITAIS E DOS PROCESSOS INTRÍNSECOS AO SENSORIAMENTO REMOTO

1. OBJETIVO

1.1. Analisar tecnicamente o contexto atual da tecnologia de imageamento orbital e, assim, estimar as características e requisitos de um sistema de imageamento orbital apto a obter ao menos **uma imagem por dia de cada ponto no território nacional** com imagens de alta resolução espacial ou melhor.

2. MOTIVAÇÃO

2.1. O Projeto Brasil M.A.I.S. prevê a contratação de diversas soluções de fornecimento de imagens e dados satelitais para apoio ao monitoramento e à consciência situacional do território nacional por sensoriamento remoto e, dentre essas soluções, evidenciam-se as de fornecimento contínuo e diário de imagens de alta resolução para todo o território nacional.

2.2. Para se compreender os requisitos de um sistema orbital apto a tal missão – imageamento diário completo do território nacional com alta ou altíssima resolução espacial –, é necessário conhecer a natureza e o atual estado da arte do imageamento satelital para estabelecer as características mínimas de um sistema orbital para atender a essa demanda.

3. ENTENDIMENTOS

3.1. Para classificação da resolução espacial em baixa, média, alta e altíssima será utilizada a Tabela 1.

Tabela 1: Classificação da resolução espacial.

TAMANHO DO PIXEL (PONTO)	CLASSIFICAÇÃO DA RESOLUÇÃO
< 1 metro	Altíssima, muito alta ou submétrica
≥ 1 e < 5 metros	Alta
≥ 5 e < 30 metros	Média
≥ 30 metros	Baixa

Fonte: Elaborada com base em Dixon, 2016 (p.84) e Shamsi, 2005 (p. 53).

3.2. Esta nota técnica limitar-se-á a realizar o levantamento e a apontar o dimensionamento necessário, não realizando qualquer julgamento de valor em relação ao atendimento ou não dos requisitos de negócio da futura contratação.

4. FUNDAMENTAÇÃO LEGAL

4.1. A Lei nº 14.133, de 2021, determina que o Termo de Referência deve conter fundamentação baseada nos estudos técnicos preliminares (art. 6º, inciso XIII, alínea "b" da Lei nº 14.133, de 2021). Assim, este documento técnico insere-se como um dos estudos preliminares destinados a melhor instruir à Administração de informações técnicas necessárias e suficientes para a tomada de decisão quanto ao tema em tela.

5. ANÁLISE

5.1. SISTEMAS ESPACIAIS

5.1.1. Sistemas espaciais são aqueles que têm, como principal elemento, um artefato em órbita no espaço, atuando para suprir determinada necessidade. Eles são caracterizados por 3 (três) segmentos: segmento solo, segmento de lançamento e segmento espacial (BAU et al., 2019).

5.1.2. O segmento solo é responsável pelo controle, rastreamento e comunicação com o segmento espacial. O segmento de lançamento é responsável por colocar o segmento espacial (artefato) em órbita. O segmento espacial é materializado pelo artefato em órbita. São exemplos de segmentos espaciais: a Estação Internacional (ISS – International Space Station), os telescópios espaciais (ex. Hubble, James Webb), as sondas espaciais (ex. Voyager-1) e os satélites artificiais (WERTZ & LARSON, 2019).

5.1.3. Os satélites artificiais, por sua vez, podem ter diversos propósitos, dentre os quais: comunicação (ex. SGDC), navegação (ex. GPS), coleta de dados (SDC), meteorologia (ex. Meteosat), pesquisa e desenvolvimento (ex. SACI), vigilância militar (satélites espiões, série Key Hole) e observação da Terra (exs: Landsat, Sentinel, CBERS, Planet/FLOCK, GeoEye, Spot) (WELTI, 2012).

5.1.4. Este trabalho se concentra nos sistemas espaciais de Observação da Terra, com foco nos satélites de Sensoriamento Remoto (segmento espacial) e em seus respectivos segmentos solo (INPE, 1). O segmento solo é, por sua vez, dividido em diferentes centros: Centro de Controle e Rastreamento, Centro de Recepção e Gravação de Dados e Centro de Processamento e Geração de Produtos (ESA, 1).

5.1.5. O Centro de Controle e Rastreamento é responsável por monitorar a órbita do satélite e, caso necessário, proceder a correções de desvios identificados. Este centro é o responsável, também, por enviar comandos para o satélite e por receber os dados de telemetria que permitem o monitoramento de todos os subsistemas do satélite (INPE, 2).

5.1.6. O Centro de Recepção e Gravação de Dados é típico de satélites de sensoriamento remoto. Ele é responsável por receber e armazenar os dados (principalmente os de imagem) transmitidos pelo satélite (INPE, 3).

5.1.7. O Centro de Processamento e Geração de Produtos é responsável pelo pré-processamento dos dados, pelas correções radiométricas e geométricas, e pela geração dos produtos que serão distribuídos aos muitos usuários. Ele responde pelo primeiro nível nos serviços relacionados ao satélite (INPE, 3).

5.1.8. Em torno dos sistemas espaciais há uma indústria que vem experimentando um crescimento constante, saindo do setor público (como a NASA) e se expandindo em pequenas, médias e grandes empresas privadas (como a Maxar, Planet Labs, SpaceX, dentre outras). No início de 2020, havia cerca de 3.200 empresas startups no setor espacial, voltadas para o que se estipulou chamar de “New Space Industry” (GOLKAR, 2020). Em 2025 o site “The Space List” (The Space List, 2025) cita mais de 4000 empresas distribuídas em noventa países, com investimentos superiores a 62 bilhões de dólares, com mais de 1600 rodadas de captação de investimentos privados.

5.1.9. De modo geral, a indústria espacial tem sido analisada a partir de quatro segmentos principais: i) fabricação, principalmente de satélites e foguetes; ii) lançamento; iii) operação de artefatos espaciais; e iv) serviços. Os dois primeiros segmentos não são objeto deste trabalho.

5.1.10. A operação e os serviços estão diretamente relacionados com o segmento solo, sendo que a *operação* responde pelo controle e rastreamento do satélite, enquanto os *serviços* estão intimamente ligados ao propósito do satélite (comunicações comerciais ou governamentais, pesquisa e desenvolvimento, ciência espacial, navegação, meteorologia, vigilância militar e sensoriamento remoto). O primeiro nível de serviço é realizado no Centro de Processamento e Geração de Produtos, e são de propósito geral. Os demais serviços estão distribuídos pela cadeia da indústria espacial, com diferentes empresas gerando serviços de propósitos específicos, agregando valor a partir do mesmo insumo.

5.1.11. Como exemplos desses demais serviços, temos: o monitoramento ambiental; o monitoramento florestal; o monitoramento agrícola (ex. evolução temporal das culturas, detecção de estresse de culturas agrícolas); a extração da malha viária e da rede hidrográfica; a modelagem hidrológica; as análises de inundação; os mapeamentos em geral; as detecções de mudanças (ex: uso da terra); o desenvolvimento urbano, entre tantos outros (LIU, 2015; JENSEN, 2007).

5.1.12. Os sistemas espaciais de Observação da Terra são caracterizados por diferentes parâmetros, os quais estão associados a diferentes grandezas físicas (KRAMER, 2002). A observação da Terra é o propósito geral que classifica um tipo de sistema espacial. Os propósitos específicos ajudarão a definir os parâmetros e as grandezas físicas associadas a este sistema. Esses propósitos estão relacionados às aplicações de Sensoriamento Remoto e, independente de uso civil, militar ou dual – ou do uso público ou privado – são estas aplicações que moldarão o sistema espacial e, mais especificamente, o satélite de Observação da Terra.

5.2. SENSORIAMENTO REMOTO

5.2.1. O sensoriamento remoto fornece uma alternativa eficiente para projetos em áreas de difícil acesso e/ou de grandes extensões geográficas; ou projetos que necessitem de alta repetitividade (alta frequência temporal) ou que requeiram comparação com o passado.

5.2.2. O custo de soluções de imageamento diversas, como, por exemplo, a aerofotogrametria, é geralmente maior que o custo das opções de imageamento por satélite. Os satélites costumam cobrir, de forma indistinta, toda a superfície do globo terrestre. O mesmo ocorre para projetos de grandes extensões territoriais, como por exemplo, monitorar de forma contínua o Estado de São Paulo. Em grandes extensões, é muito mais eficiente utilizar sistemas espaciais do que sistemas aerotransportados.

5.2.3. Projetos que requerem um monitoramento com alta frequência temporal são mais bem atendidos por constelações de satélites de observação da Terra, bem como os projetos que requerem uma comparação entre o estado atual e o estado de uma determinada época no passado. Os satélites, diferentemente das aeronaves, estão em operação contínua durante toda a sua vida útil, adquirindo constantemente imagens sobre a superfície da Terra e construindo um rico acervo de dados.

5.2.4. Para cada aplicação, há um conjunto de parâmetros e grandezas físicas que caracterizam o satélite e a imagem que leva a escolha da melhor solução para a aplicação. Os satélites de Observação da Terra podem ser ópticos ou radar.

5.2.5. Os fatores que favorecem o uso de satélites ópticos em detrimento do radar vão desde a disponibilidade de imagens gratuitas da tecnologia ótica, passando pela maior facilidade de interpretação dos dados (as imagens óticas se assemelham ao que o ser humano se acostumou a ver), maior variedade de satélites e de imagens, o maior contingente de especialistas; tudo isto levando ao maior número de usuários.

5.2.6. Este trabalho foca nos satélites de tecnologia ótica.

5.3. CARACTERIZAÇÃO DE UM SATÉLITE DE OBSERVAÇÃO DA TERRA

5.3.1. O satélite de Sensoriamento Remoto é caracterizado basicamente por sua órbita e seus sensores. Os principais parâmetros orbitais são (SEBESTYEN et al., 2018):

- Altitude média (H);
- Inclinação (I);
- Hora de cruzamento com o Equador;
- Período orbital (P);
- Número de órbitas diárias (n);
- Ciclo orbital (T);
- Número de órbitas do ciclo orbital (N).

5.3.2. A **altitude média (H)** geralmente é definida em função das características do principal sistema sensor (câmera) do satélite. Ela é função da distância focal (f), do tamanho físico do detector para cada pixel (d) e da resolução espacial (re) desejada para a câmera. A altitude média é calculada da seguinte forma:

$$H = (f * re) / d$$

Ex.: CBERS-4A, sensor WPM multispectral

$$f = 2.204\text{mm}$$

$$d = 0,028\text{mm}$$

$$re = 8\text{m}$$

$$H = 629.714\text{m} = 629,714\text{km}$$

5.3.3. Dependendo da aplicação, a faixa ótima de lançamento de satélites de sensoriamento remoto fica entre 600km e 900km. Abaixo de 600km, o arrasto atmosférico provoca uma redução na vida útil do satélite. Quanto maior a altitude, maior o custo do lançamento do satélite. A constelação PlanetScope da empresa Planet Labs opera entre 475 e 525km, fazendo a escolha por menor custo e melhor resolução espacial em troca de uma vida útil reduzida pela degradação da órbita e subsequente reentrada dos satélites na atmosfera.

5.3.4. A **Inclinação (I)** é função da altitude média (H), caso o satélite tenha uma órbita sol-síncrona para garantir a mesma condição de iluminação (a menos de efeitos sazonais e atmosféricos) em toda a superfície da Terra (SEBESTYEN et al., 2018). Nesse caso, a inclinação define-se por:

$$I = f(H) \text{ para órbitas sol-síncronas (órbitas quase-polares, grande cobertura do globo).}$$

5.3.5. Porém, se um satélite for lançado com uma missão específica, ele pode ser colocado em órbita diferente da quase-polar. As órbitas equatoriais cobrem apenas a parte central da Terra (geralmente a faixa entre os paralelos 45°S e 45°N).

5.3.6. A **hora de cruzamento com o Equador**, considerando-se órbitas sol-síncronas, é caracterizada pelo exato momento (horário) em que o satélite cruza a linha do equador (0° de latitude), o que vai caracterizar as condições de iluminação na aquisição das imagens.

5.3.7. O horário deve ser definido em função da finalidade do satélite. Satélites voltados para a construção de modelos de elevação do terreno, em função de pares estereoscópicos, devem capturar imagens quando o sol se encontra no zênite, minimizando o efeito do sombreamento. Porém, há outras ocasiões em que a visualização de sombreamento é recomendável, de acordo com definidas finalidades.

5.3.8. O **Período orbital (P)** está diretamente associado com a altitude média (H) do satélite (mais especificamente com o semi-eixo maior da órbita), pela 3ª Lei de Kepler (WELTI, 2012).

5.3.9. Quanto maior a altitude, maior o período orbital.

5.3.10. O **número de órbitas diárias (n)** é dado pelo período de tempo relativo a um dia dividido pelo período orbital (P). Se o período orbital for representado em minutos:

$$n = (24 * 60) / P$$

5.3.11. O número de órbitas diárias varia entre 14 e 15.

5.3.12. Quando o número de órbitas diárias (n) é representado na forma de fração ($n = i + \text{num./den.}$), o **Ciclo Orbital (T)**, representado em dias, é dado pelo denominador (den.). O Ciclo Orbital define o período necessário para o recobrimento de toda a Terra.

$$\text{Ex.: Landsat}=8; n = 14 \frac{9}{16}; \text{Ciclo Orbital (T)} = 16 \text{ dias.}$$

5.3.13. Como o satélite recobre áreas em todos os pontos do Planeta em função do movimento simultâneo deste e o de rotação da Terra, o Ciclo Orbital representa também o tempo necessário para que um satélite consiga cobrir grandes extensões, independentemente da posição geográfica. Ou seja, para o satélite Landsat-8 cobrir o planeta com imageamento em nadir (ou seja, mantendo-se as configurações orbitais), o Brasil, a Amazônia, ou o Estado do Pará, serão necessários 16 (dezesseis) dias.

5.3.14. O **número de órbitas do Ciclo Orbital (N)** é dado pelo número de órbitas diárias do satélite (n) multiplicado pelo Ciclo Orbital (T).

$$N = n * T$$

5.4. CONSTELAÇÃO DE SATÉLITES

5.4.1. Geometria da Constelação

5.4.1.1. Quando um sistema espacial for uma constelação de n satélites igualmente espaçados na mesma órbita (órbita sincronizada), o Ciclo Orbital da Constelação (T_c) é o Ciclo Orbital de um satélite (T), dividido pelo número de satélites da constelação.

Ex: Sentinel-2; $T = 10$ dias; $N_s = 2$; $T_c = 5$ dias.

5.4.1.2. As constelações com poucos satélites geralmente apresentam a disposição de satélites igualmente espaçados: RapidEye (5 satélites); Sentinel-2 (2 satélites); Spot-6&7 (2 satélites) e Pleiades-A&B (2 satélites).

5.4.1.3. Os satélites Spot-6&7 e Pleiades-A&B estão defasados de 90° um do outro, formando uma constelação de quatro satélites (mas com sensores de características distintas em termos de resolução espacial e espectral); porém, intercalados para que os dois satélites Spot, bem como os dois satélites Pleiades, estejam defasados de 180° um do outro (diametralmente opostos), formando duas constelações de dois satélites cada (Figura 1). De forma análoga, os satélites de alta resolução da Maxar (GeoEye, WorldView-2 e WorldView-3) são alinhados também para compor uma constelação igualmente espaçada, mesmo seus satélites possuam diferenças para com os outros. Nesses casos, todos eles podem guardar a condição de sol-síncrona, cruzando a linha do equador (latitude 0°) sempre no mesmo horário local.

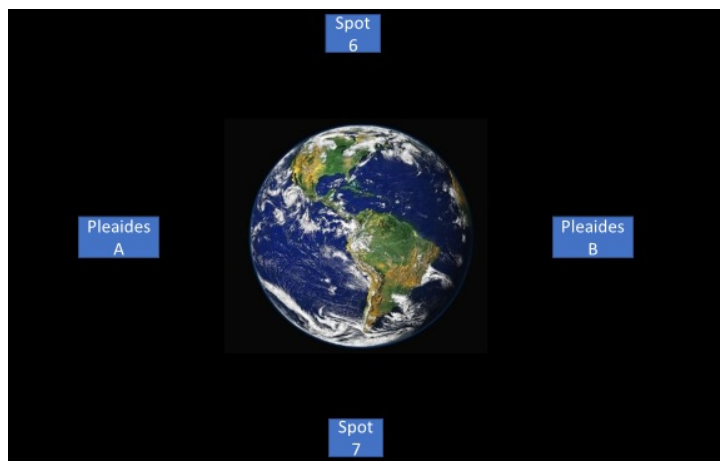


Figura 1: Constelação Spot-6&7 e Pleiades-1A&1B.

5.4.1.4. Quando a constelação é composta por dezenas de satélites (ex. constelação PlanetScope (Flock) da Planet Labs), pode-se usar o expediente de se dividir os satélites em diferentes órbitas. Uma das vantagens é ter um conjunto de satélites sol-síncrono com o horário da manhã, e outro sol-síncrono com o horário da tarde. Muitas vezes, esse expediente aumenta a probabilidade de aquisição de imagens livres de nuvem; pois, há regiões em que é muito comum a formação de nuvens pela manhã e pouco comum à tarde, e vice-versa.

5.4.1.5. Outra vantagem de se ter uma constelação com seus satélites distribuídos em mais de uma órbita é a viabilização de alguns satélites em órbita quase-polar e outros em inclinação mais próxima ao Equador. Esse procedimento aumenta a aquisição de imagens em regiões entre os paralelos 45° S e 45° N, onde se encontra a totalidade do território do Brasil. Ou seja, para otimizar as coberturas, a constelação pode ter um conjunto de satélites em órbitas quase-polares (sol-síncronas) e outro em órbitas quase-equatoriais. As órbitas quase equatoriais são mais eficientes para imagear as regiões mais próximas ao Equador.

5.4.1.6. Os satélites de sensoriamento remoto costumam ser ativos nas órbitas descendentes. Com constelações, alguns satélites podem atuar nas órbitas ascendentes, sob diferentes condições de iluminação, com diferentes respostas espectrais, permitindo mais possibilidades de discriminação de alvos. A combinação destes fatores aumenta a eficiência do Sistema Espacial de Observação da Terra.

5.4.1.7. Arranjos possíveis para constelações:

- Órbitas em horários diferentes: ex. manhã e tarde.
- Órbitas em diferentes inclinações: polares e equatoriais.
- Órbitas ascendentes e descendentes.

5.4.1.8. Alguns sistemas espaciais mais modernos são formados por dezenas (em um dos casos mais de uma centena) de satélites menores e com menor custo que as gerações anteriores. Devido ao tamanho dessas constelações, a perda de um satélite causa pouco impacto no desempenho total do sistema, podendo até ser completamente compensada pelos demais. Eles são lançados em grandes quantidades, sempre levando inovações e aumentando a qualidade dos produtos gerados. No caso de pequenos satélites que não realizam apontamento dinâmico, a área imageada é fixa e não sofre ajustes para alvos específicos; essa menor flexibilidade é compensada pelo maior número de satélites, aumentando a resolução temporal da constelação.

5.4.1.9. Por outro lado, as constelações de poucos e grandes satélites (constelações mais tradicionais) aproveitam pouco das vantagens das constelações. A reposição de um satélite é demorada e caso ocorra um imprevisto, como a perda precoce do WorldView-4, a constelação tem que ser reprojetaada com custosas manobras para posicionar os satélites restantes. Porém, os grandes satélites tradicionais, apesar da baixa resolução temporal, possuem maior capacidade de manobras de apontamento (visualização off-nadir), compensando a baixa resolução temporal com o aumento de revisita.

5.4.1.10. A constelação de satélites é a forma de contornar os obstáculos intrínsecos aos sensores remotos. Como a melhora na resolução espacial provoca uma redução na largura da faixa imageada e, consequentemente, uma piora na resolução temporal (rt), o uso de mais satélites na constelação compensa esses parâmetros.

5.4.2. Taxa de transmissão de dados

5.4.2.1. Ao longo do tempo, muito investimento foi realizado no desenvolvimento de algoritmos para compressão de dados em tempo real, visando o maior aproveitamento da taxa de transmissão. A taxa de transmissão é um dos maiores obstáculos para que sensores de alta resolução espacial possam apresentar extensas faixas de imageamento.

5.4.2.2. Analisando a evolução da tecnologia de transmissão de dados ao longo do tempo, verifica-se grande evolução: do satélite Landsat-1, lançado em 1972, ao satélite WorldView-3, lançado em 2014, a taxa de transmissão de dados aumentou em 7.900% (de 15Mbps para 1200Mbps), enquanto o número de pixels por km^2 passou de 156,25 para 10.405.827,26 (aumento de cerca de 6.659.600%) (Landsat Science e WorldView-3).

5.4.3. Ângulo de aquisição

5.4.3.1. A capacidade de manobra do satélite, permitindo aquisições de imagens em diferentes ângulos de visada (off-nadir) além do imageamento perpendicular (nadir), são importantes para aumentar o potencial de imageamento.

5.4.3.2. Esta capacidade está diretamente relacionada com a possibilidade do satélite em revisitar um mesmo ponto (alvo). Sem isto, satélites de altíssima resolução espacial levariam meses para revisitar um alvo (Ciclo Orbital). Porém, com essas manobras, a revisita pode ser feita em poucos dias, e até mesmo em um dia, dependendo da inclinação da visada e da latitude do alvo (quanto maior a latitude – mais próxima aos polos –, menor o tempo para revisitar um alvo).

5.4.3.3. O ideal é restringir os ângulos de visada oblíqua (off-nadir) a 20°, podendo relaxar até 30° em função da aplicação e da urgência do imageamento. Em visadas acima destes valores, a distorção geométrica é muito acentuada e a resolução espacial pode cair até pela metade. Ou seja, acima de 30° somente em casos específicos.

5.4.3.4. Conforme pode ser verificado na Figura 2 abaixo, a resolução espacial dobra de valor para um ângulo off-nadir de 41,3° (de 1,80m para 3,60m). Com ângulos off-nadir de 20° e 30° as distorções da resolução espacial são de 15% e 40%, respectivamente. Com ângulo off-nadir de 45° a distorção alcança 135%.

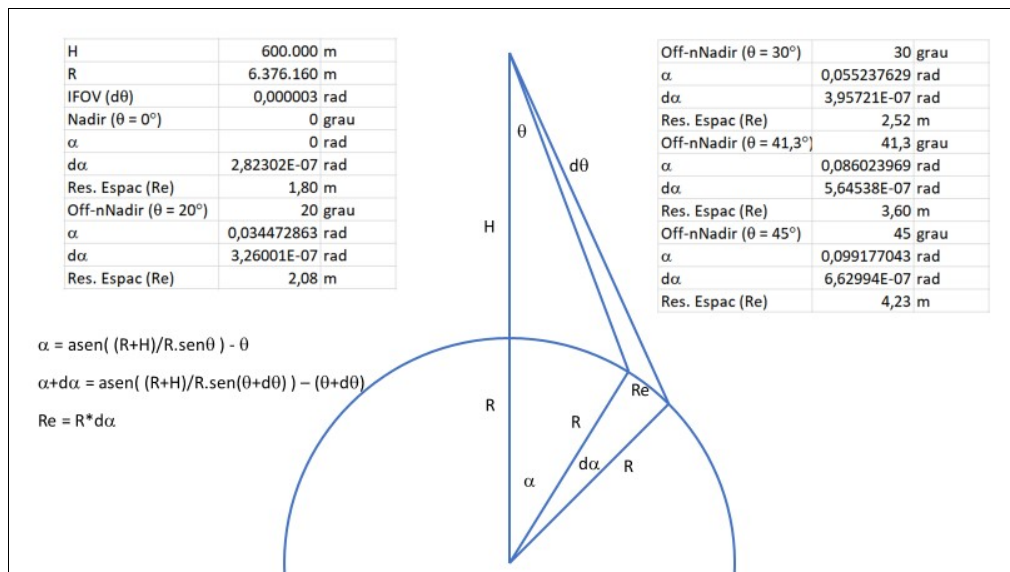


Figura 2: Variação da resolução espacial (Re) em função do ângulo de visada oblíqua (off-nadir) (letra grega theta). (MACHADO & SILVA, 2007).

5.4.3.5. Os mesmos efeitos da aquisição off-nadir e respectivos resultados relacionados podem ser vistos no Guia do Usuário Spot (SPOT 6 & SPOT 7 Imagery - User Guide, Appendix C – Geometric Modeling) e apresentados na Figura 3 abaixo. Apresentado em destaque (em vermelho) a coluna que considera a esfericidade da Terra (é a maior fonte de degradação da resolução espacial em imagens em visada oblíqua (off-nadir). A distorção percentual da tabela dos satélites Spot-6&7 (Figura 3) é prejudicada em relação a do exemplo da Figura 2, pois ela aumenta com a altitude do satélite (Figura 2, H = 600km e Figura 3 – Spot – H = 699km).

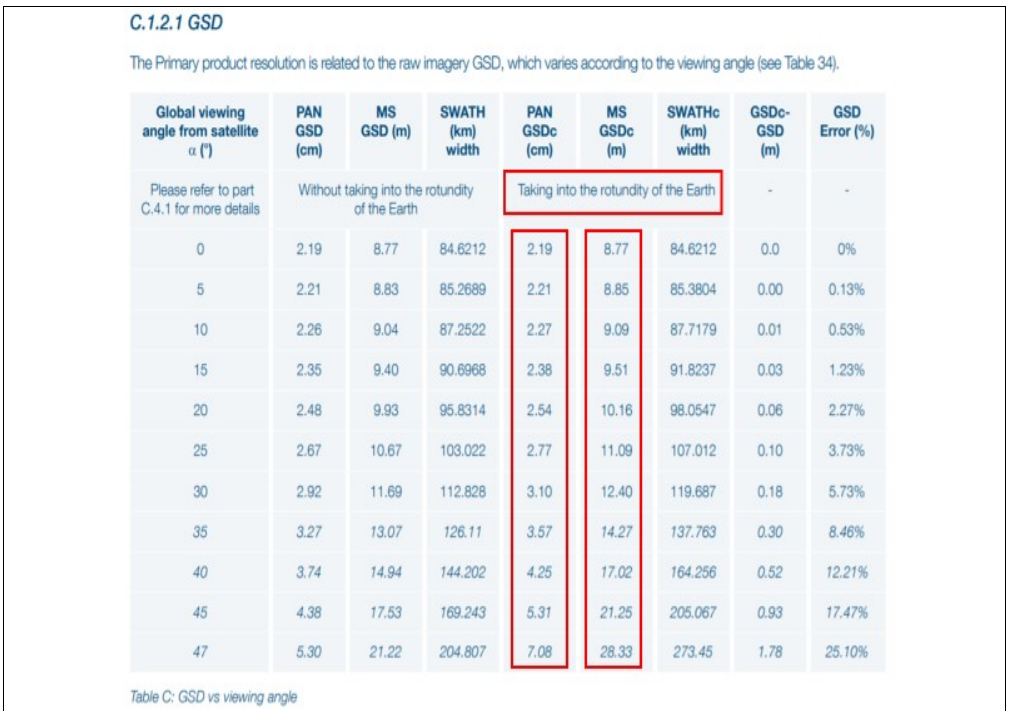


Figura 3: Variação da resolução espacial (Re) das câmeras dos satélites Spot-6&7 em função do ângulo de visada oblíqua (off-nadir) (letra grega theta) (SPOT 6 & SPOT 7 Imagery - User Guide, Appendix C – Geometric Modeling).

5.4.3.6. Destaca-se que não se pode confundir a capacidade de revisita com a capacidade de imagear extensas áreas. No momento em que o satélite está se posicionando para uma visada oblíqua (off-nadir), ele está deixando de imagear a área que está diretamente abaixo dele (na direção nadir). Ou seja, a capacidade de apontamento não aumenta a capacidade de imageamento de extensas áreas e com alta frequência de aquisição. Esta capacidade é dada pelo Ciclo Orbital do sistema espacial (satélite ou constelação de satélites).

5.4.3.7. Um dos problemas das imagens em visada off-nadir é que a condição de imageamento sol-síncrono é afastada. Ao se dirigir para uma região fora do nadir, as condições de iluminação se alteram, o que dificulta a análise de séries temporais. Ainda, quando maior o ângulo de aquisição (mais off-nadir), maiores as distorções espaciais na imagem. Por fim, é preciso tomar cuidado com a “especificidade” em imagens de visada oblíqua, quando as condições de imageamento ficam muito prejudicadas. Quanto mais satélites possui uma constelação, mais propiciada é a obtenção de imagens em nadir – ou seja, o imageamento de determinado ponto na superfície tende a dispensar o uso de alterações no ângulo e visada. A capacidade de aquisição de imagens em nadir e/ou com baixos ângulos de aquisição melhora significativamente as análises de séries temporais, como por exemplo a detecção de mudanças. Esta melhora decorre da maior fidelidade da geometria das imagens, favorecendo consequentemente, também, o correto registro das imagens e os resultados gerados.

5.5. CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES IMAGEAMENTO E SEUS PARÂMETROS

5.5.1. De forma simplista, nas imagens óticas, os sensores de imageamento correspondem as câmeras que capturam as imagens. Assim, as câmeras possuem uma série de parâmetros intrínsecos e que se relacionam diretamente com a taxa de transmissão de dados (Tx), impactando de forma direta a capacidade de imageamento.

5.5.2. Os parâmetros que caracterizam a câmera são (KRAMER, 2002):

- Largura da faixa de imageamento (L)
- Resolução espacial (re)
- Resolução radiométrica (rr)
- Resolução espectral (rs)
- Resolução temporal (rt)

5.5.3. **Largura da Faixa de Imageamento (L):**

5.5.3.1. Os sensores orbitais clássicos trabalham com a técnica "push broom", que consiste em imagear progressivamente uma faixa no solo perpendicular ao sentido de deslocamento do satélite uma linha por vez. A união das linhas forma a imagem completa, que pode ser uma faixa de centenas de quilômetros de extensão. O comprimento das linhas é a largura dessa faixa de imageamento (L), também chamado de "swath".

5.5.3.2. A largura da faixa de imageamento (swath) (L) está diretamente associada ao Ciclo Orbital do satélite (T), mas essa relação é inversamente proporcional, se mantidos os demais parâmetros orbitais. Quanto maior a largura, menor o Ciclo Orbital e mais rapidamente é possível cobrir todo o globo terrestre.

5.5.3.3. Exemplos com satélites de média resolução:

- CBERS-4A: swath (L) de 95km. Precisa de 31 (T) dias para cobrir todo o planeta.
- CBERS-4: swath (L) de 115km. Precisa de 26 (T) dias para cobrir todo o planeta.
- Landsat-8: swath (L) de 185km. Precisa de 16 (T) dias para cobrir todo o planeta.
- Sentinel-2: swath (L) de 290km. Precisa de 10 (T) dias para cobrir todo o planeta.

5.5.3.4. Uma observação sobre esses dados indica que o produto da largura da faixa de imageamento (L) pelo ciclo orbital (T) é aproximadamente constante:

- CBERS-4A: $95 \times 31 = 2945$.
- CBERS-4: $115 \times 26 = 2990$.
- Landsat-8: $185 \times 16 = 2960$.
- Sentinel-2: $290 \times 10 = 2900$.

5.5.3.5. É possível notar que o produto em questão tem como resultado um valor próximo a 2950 (entre 2000 e 3000). Ou seja, para uma câmera com largura de faixa de imageamento de 30km, o ciclo orbital será de aproximadamente 98 dias (97 a 100 dias, ou seja, acima de três meses).

5.5.3.6. Alguns exemplos de largura de faixa de imageamento (L) de sensores de alta resolução espacial e os respectivos períodos dos ciclos orbitais:

- L = 10km, T = 295 dias (290 a 300 dias)
- L = 20km, T = 148 dias (145 a 150 dias)
- L = 30km, T = 98 dias (97 a 100 dias)
- L = 40km, T = 74 dias (73 a 75 dias)

5.5.3.7. Ou seja, os parâmetros L e T são inversamente proporcionais. Como exemplo, um aumento de 50% na faixa de imageamento (L) permite uma redução de 33% no Ciclo Orbital (T):

$$\begin{aligned}L * T &= L' * T' \\L' &= (1,5) * L \\T' &= 2T/3 = 0,67T\end{aligned}$$

5.5.3.8. A largura da faixa de imageamento (L) está diretamente relacionada com a taxa de transmissão de dados (Tx). Se for mantida a resolução espacial, um aumento em L acarreta um aumento em Tx na mesma proporção, considerando a mesma compressão. Ou seja, os parâmetros L e Tx são diretamente proporcionais. Esse condicionamento limita de forma significativa que sejam agregados em um mesmo satélite uma grande largura de faixa de imageamento (L) com imagens de alta resolução espacial, pois isso solicitaria ainda maior taxa de transmissão de dados (Tx) para que o aumento no volume de dados fosse atendido.

$$\begin{aligned}L &\rightarrow Tx \\L' &= (1,5) * L \rightarrow Tx' \\Tx' &= (1,5) * Tx\end{aligned}$$

5.5.3.9. Numa constelação, a largura da faixa de imageamento efetiva (Lc) é dada pelo somatório das larguras da faixa de imageamento de cada satélite (Li). Se todos os satélites são iguais:

$$Lc = Ns * L$$

5.5.4. **Resolução espacial (re)**

5.5.4.1. A construção de uma imagem digital abrange dois processos: amostragem e quantização. A amostragem é a transformação em valores discretos sinal analógico, no domínio espacial, e está diretamente associada à resolução espacial (re) (PROAKIS & MANOLAKIS, 2007).

5.5.4.2. No caso de imagens de satélites, a resolução espacial (re) representa o espaço físico em que o sensor registra (amostra) a resposta do terreno. Ela está relacionada à capacidade da câmera em identificar alvos no terreno.

5.5.4.3. A resolução espacial também deve se adequar ao objetivo da análise. Por exemplo, se o objetivo for detectar um objeto no oceano, a resolução espacial (o tamanho do pixel da imagem) pode ser igual ou até um pouco inferior à do objeto que se deseja detectar. Se além disso, o objetivo for identificar o alvo (ex: embarcação, plataforma marítima, rochedo), a resolução espacial deve ser melhorada; se o objetivo for caracterizar o alvo (ex: navio petroleiro, navio cargueiro, navio de cruzeiro), a resolução espacial tem que ser ainda melhor. Em regra, para caracterizar um alvo são necessárias algumas dezenas de pixels.

5.5.4.4. Tanto a detecção quanto a identificação e a caracterização dependem do contexto em que o alvo está. Por exemplo: um rio de 5m de largura pode ser detectado em uma imagem de 5m de resolução espacial caso ele se destaque espectralmente do seu entorno. O mesmo pode ser dito em relação a uma estrada de 5m de largura. Contudo, para caracterizar o número de vias de rolamento da hipotética estrada e o material que a compõe, será necessária uma resolução espacial melhor que 5m. Como segundo exemplo: se um determinado alvo tem dimensões de 5m x 5m e o sensor tem resolução espacial de 5m x 5m, o objeto ocupará (parcialmente) até quatro pixels da imagem final e não será possível visualizar detalhes. Nesse caso, talvez seja possível detectar a presença do objeto - por exemplo se fosse um objeto completamente branco em um terreno escuro - mas em áreas urbanas é improvável que se possa até mesmo afirmar se o objeto está presente ou não na cena. Via de regra, essa resolução seria suficiente para detectar a presença de uma balsa atravessando um rio, mas não seria possível contar com confiança a quantidade de automóveis transportados. Alguns satélites oferecem resolução espacial de 30cm, permitindo realizar tarefas como contar gado no pasto ou identificar o tipo e cor de um automóvel na imagem - seria possível diferenciar uma picape de um SUV, e um carro vermelho de um carro azul, mas não seria possível determinar modelos e marcas específicos.

5.5.4.5. Ao se realizar classificação de imagens, o menor tamanho de cada classe costuma ser, em regra, algumas dezenas de pixels, pois a imprecisão de se classificar objetos pequenos é maior e requer mais recursos de processamentos, informação por unidade de área e de informação temporal.

5.5.4.6. Em relação à resolução espacial, a solicitação por aumento na taxa de transmissão de dados varia com o inverso do quadrado da resolução espacial se mantidos os demais parâmetros. Ou seja, uma melhora de duas vezes na resolução espacial (ex: resolução espacial de 10m para 5m) acarreta num aumento de quatro vezes na quantidade de dados a ser transmitida (ex: Tx de 120Mbps para 480Mbps), considerando a mesma taxa de compressão, uma vez que a quantidade de amostras por unidade de

área cresce nessa proporção.

5.5.4.7. Devido à dificuldade de aumentar a taxa de transmissão de dados (Tx), na prática, a melhora da resolução espacial acarreta a redução da largura da faixa de imageamento (L) como forma de compensação (consequentemente, no aumento do período do ciclo orbital T). Essa dependência está associada à limitação da indústria quanto a transmissão e compressão de dados, o que acarreta numa alta dependência entre a largura de faixa e alta resolução espacial. Sintetiza-se:

$re \rightarrow Tx$ (se para uma certa resolução espacial temos uma determinada taxa de transmissão)

$k.re \rightarrow Tx'$ (calculemos a nova taxa de transmissão para k.re)

$$Tx' = Tx / k^2$$

Ex: $re = 1m$ e $Tx = 200Mbps$. Para uma resolução espacial de 0,5m ($k=0,5$), a taxa de transmissão de dados seria:

$$Tx' = 200 / (0,5^2) = 800Mbps.$$

5.5.4.8. Para manter a mesma taxa de transmissão, seria necessário reduzir a largura da faixa de imageamento (L) em 75%.

Ex: $re = 1m$, $L = 40Km$ e $Tx = 200Mbps$. Para uma resolução espacial de 0,5m ($k=0,5$), e mesma taxa de transmissão de dados, a largura da faixa de imageamento seria:

$$L' = L/4 = 10km$$

5.5.4.9. Se no primeiro cenário ($re = 1m$ e $L = 40km$), o ciclo orbital era de 74 dias; no segundo ($re = 0,5m$ e $L = 10km$), o ciclo iria a 295 dias.

5.5.4.10. A definição da altitude do satélite (H) geralmente decorre dos seguintes parâmetros: re , f , e d . Por exemplo: uma câmera faz uso de uma barra de detectores onde cada detector (d) tem 6,5 μm de tamanho. A distância focal (f) pode alcançar o tamanho máximo de 4m (existe uma grande dificuldade em alcançar grandes distâncias focais) e a resolução espacial desejada é de 1m. Neste caso tem-se:

$$H = 4.000.000 (\mu m) / 6,5 (\mu m) * 1 (m) = 615.385 m = 615,385km$$

5.5.4.11. Se a altitude for menor, a resolução espacial será melhor.

Por exemplo: $H = 500Km$.

$$re = H * d / f = 500.000 (m) * 6,5 (\mu m) / 4.000.000 (\mu m) = 0,81m.$$

5.5.4.12. Apesar de tenderem a propiciar maiores resoluções espaciais, altitudes (H) mais baixas diminuem a vida útil do satélite, além de diminuírem a faixa de imageamento (L). Por conta desses fatores, a opção pode ser pela altitude próxima a 615km.

5.5.4.13. Esta questão da taxa de transmissão (Tx) e resolução espacial (re) pode ser notada nos sensores de alta resolução espacial. Geralmente eles são compostos por uma banda pancromática (PAN) com resolução espacial (re) e 4 bandas espectrais (MS) com resolução quatro vezes menor que a resolução espacial da banda pancromática (ou seja, geralmente, $re_{MS} = 4re_{PAN}$).

5.5.4.14. Considerando a taxa de transmissão de cada banda espectral como sendo Tx, a taxa de transmissão da banda pancromática seria 16Tx. A taxa de transmissão total do sensor seria:

$$16Tx (PAN) + 4*Tx (MS) = 20Tx.$$

5.5.4.15. Se a banda pancromática fosse eliminada e todas as bandas espectrais fossem geradas com a mesma resolução espacial (re) da banda pancromática, a taxa de transmissão do sensor seria:

$$4*16Tx (MS) = 64Tx.$$

5.5.4.16. Essa abordagem geralmente é inalcançável na tecnologia atual. Por isso a adoção de bandas com resoluções espaciais distintas, o que provoca uma redução de, aproximadamente, 68,75% na taxa de transmissão de dados, a depender da eficiência quântica do sensor.

Ex: banda PAN 0,5m (800Mbps) e 4 bandas MS 2,0m (50Mbps cada banda).

$$Tx \text{ do sensor} = 800 + 4*50 = 1.000Mbps = 1Gbps$$

Ex: 4 bandas MS 0,5m (800Mbps cada banda).

$$Tx \text{ do sensor} = 4*800 = 3.200Mbps = 3,2Gbps \text{ (inviável nos dias de hoje; considerando-se o mesmo padrão na taxa de compressão)}$$

5.5.4.17. Um exemplo clássico é o satélite Spot-1. Ele tinha 2 (duas) câmeras e cada uma podia operar em 2 (dois) modos diferentes: pancromático (PAN) com 10m de resolução espacial ou multiespectral (MS) com 3 bandas com 20m de resolução espacial. Assim sendo, 1 pixel MS equivalia a 4 pixels PAN. O modo MS tinha 3 bandas e o modo PAN apenas uma. Por fim, para equilibrar as taxas de transmissão, a resolução radiométrica das bandas espectrais era 8 bits e a da banda pancromática era 6 bits. Sintetiza-se:

$$1 \text{ pixel MS} \times 3 \text{ bandas} \times 8 \text{ bits} = 4 \text{ pixels PAN} \times 1 \text{ banda} \times 6 \text{ bits}$$

5.5.4.18. Principais obstáculos para melhora da resolução espacial:

- Limitação imposta pelas leis da física vinculadas ao tamanho da abertura do telescópio imageador (Critério de Rayleigh);
- Limitações impostas pela tecnologia para construir sensores e sistemas ópticos capazes de se aproximar dos limites físicos;
- Limitação da taxa de transmissão;
- Órbitas baixas reduzem a vida útil do satélite.

5.5.4.19. Para contornar a limitação da taxa de transmissão, investe-se em algoritmos de compressão de dados que gerem pouca ou nenhuma perda de informação.

5.5.4.20. Diversas técnicas são empregadas para superar essas limitações tecnológicas. Com relação à resolução do sensor, por exemplo, a Airbus superpôs duas barras de detectores, defasadas no plano focal, de forma a se ter pixels que correspondem à metade do pixel nativo (esta operação é denominada de “supersampling”). Porém, a qualidade não é a mesma da resolução nativa. Com relação à distância focal efetiva da câmera (que é, na verdade, um telescópio), é possível modificar o caminho da luz utilizando leiautes do tipo Cassegrain e outros que fazem o telescópio funcionar como se fosse um dispositivo muito mais longo, com distância focal efetiva de vários metros.

5.5.4.21. Com relação à limitação das leis da física, para melhorar a resolução espacial é preciso aumentar o tamanho da abertura útil. Existem subterfúgios como combinar vários telescópios para simular um telescópio maior, mas não são práticos no espaço. Na prática, maior resolução requer um telescópio maior, portanto um satélite maior. Para realizar uma imagem de 20cm de resolução espacial a 500km de altitude, por exemplo, seria necessário um telescópio com cerca de 2 metros de diâmetro. A constelação PlanetScope (Flock) tem câmeras com abertura de 10cm, o que limita sua resolução máxima a cerca de 3,5m, dependendo do comprimento de onda e da altitude exata utilizados no cálculo.

5.5.4.22. É importante frisar que a resolução espacial influencia nas mais diversas áreas do planejamento de uma operação como, por exemplo, na consideração da “escala” de uma carta-imagem que se necessita para um determinado objetivo, ou no grau de detalhamento previsto para que se possa extrair as informações necessárias de uma região de interesse. O número de escala está diretamente associado à resolução espacial.

5.5.4.23. Por fim, é importante também destacar que a indústria de entretenimento muitas vezes mostra o sensoriamento remoto de forma fantasiosa. Coisas como ler a hora no relógio de alguém, ler a placa de um carro ou realizar reconhecimento facial a partir de imagens de satélite ainda não são possíveis. Para aplicações onde se precisa de resolução espacial na faixa de centímetros ou milímetros e visadas muito oblíquas pode-se utilizar sensores sofisticados, aerotransportados por drones de baixa altitude que possuem autonomia, disponibilidade e alcance limitados.

5.5.5. Resolução radiométrica (rr)

5.5.5.1. O segundo processo na construção de uma imagem digital é a quantização. A quantização define o número de valores em que o sinal (ex. radiância) será registrado. Nas imagens digitais, a quantização é feita em potências de 2 (bits). Por exemplo, uma quantização em 8 bits tem 256 diferentes níveis de cinza (0 a 255, correspondendo a 2^8), enquanto uma quantização em 10 bits apresenta 1024 diferentes níveis de cinza (0 a 1023, correspondendo a 2^{10}) (PROAKIS & MANOLAKIS, 2007).

5.5.5.2. O nível de cinza mais elevado (no caso, “255”, em 8 bits; ou “1023”, em 10 bits) representa a radiância máxima (1,0) e o nível de cinza “0” representa a radiância mínima (“0”). A relação entre nível de cinza e radiância sai de uma simples regra de 3:

$$\text{Rad} = \text{NC} / \text{NCmax}$$

Ex: quantização em 10 bits:

$$\text{NCmax} = 1023$$

$$\text{NC} = 632$$

$$\text{Rad} = 632 / 1023 = 0,618$$

Onde "Rad" é a radiância, "NC" é o nível de cinza do pixel, "NCmax" é o máximo nível de cinza suportado pelo sensor.

5.5.5.3. Cada novo bit usado na quantização corresponde a dobrar o número de níveis de cinza. O crescimento no volume de dados é o menos significativo entre todos os parâmetros que caracterizam o sensor. De 8 para 9 bits (256 para 512 níveis de cinza), tem-se um crescimento de 12,5% no volume de dados (ou em Tx). De 9 para 10 bits (512 para 1024 níveis de cinza), tem-se um crescimento de 11,1%. De 11 para 12 bits (2048 para 4096 níveis de cinza), tem-se um crescimento de 9,1% em Tx.

5.5.5.4. O crescimento histórico de 6 bits (64 níveis de cinza) (Landsat-1) para os atuais 12 bits (4096 níveis de cinza) representa um aumento de 100% no volume de dados (ou em Tx) e em 64 vezes (6300%) em tons de cinza da imagem, permitindo uma melhor representação, inclusive um maior aproveitamento das áreas de sombras.

5.5.5.5. No início (anos 1970 e até 1980), os recursos computacionais eram limitados e as imagens eram analisadas visualmente pelos especialistas. Como o olho humano consegue distinguir em torno de 40 a 50 níveis de cinza, um sensor com 6 bits (64 níveis de cinza) era bem aceitável. Porém, com os avanços computacionais, cada nível de cinza do sensor de 6 bits foi dividido em outros 64 níveis de cinza do sensor de 12 bits. E estes 64 níveis de cinza, que são vistos de forma homogênea pelo olho humano, são totalmente distinguíveis pelo computador.

5.5.5.6. Em regiões homogêneas como, por exemplo, na Amazônia, a resolução radiométrica pode ser mais importante que a resolução espacial dependendo do objetivo. Por outro lado, em regiões com muita heterogeneidade como, por exemplo, áreas urbanas, a resolução espacial pode se tornar mais importante que a resolução radiométrica para o objetivo do analista.

5.5.5.7. A resolução radiométrica é limitada pela relação Sinal/Ruído da imagem, e também está relacionada com a resolução espacial e a largura de banda de cada uma das bandas escolhidas (verde, azul, vermelho, "red edge", azul costal, etc).

5.5.5.8. O ruído em uma imagem digital se apresenta visualmente como um "chuveiro" ou um "salpicado" aleatório de pontos de diversas intensidades e pode ser medido obtendo uma série de imagens com a câmera tampada - o que produzirá cenas "pretas" mostrando apenas os "salpicados" provocados pelo ruído. Se a intensidade do ruído for 1% do valor máximo (radiância equivalente de 0.01), por exemplo, é suficiente quantizar a imagem com 7 bits (128 níveis de cinza), uma vez que o ruído tornaria níveis adicionais irrelevantes. Se a intensidade do ruído tiver uma radiância equivalente de $1 \cdot 10^{-4}$ (0.0001), é importante utilizar 14 bits na quantização para capturar todas as nuances do sinal, se houver banda disponível.

5.5.5.9. São colocados filtros espectrais sobre os pixels "coloridos" do sensor de forma a deixar passar apenas a banda que se deseja capturar. Para imagens no espectro visível, poderiam ser colocados filtros para passagem de uma faixa em torno do azul, outra em torno do verde e outra em torno do vermelho, por exemplo. Cada um desses filtros diminui a sensibilidade do pixel, pois diminui o sinal captado sem diminuir o ruído.

5.5.5.10. Outro parâmetro que afeta o ruído é a resolução espacial (caso os demais parâmetros se mantenham constantes). Pixels menores captam menos luz, e o ruído não diminui na mesma proporção. Tal correlação é explorada em sensores que possuem pixels "coloridos" (parte multiespectral) e pixels "cinzas" (parte pancromática), onde a relação sinal-ruído pode ser mantida sob controle ao utilizar pixels menores (maior resolução espacial) sem filtro de cor e pixels maiores (menor resolução espacial) com filtro. Pode-se manter a mesma resolução radiométrica fazendo uma troca entre resolução espectral e resolução espacial.

5.5.5.11. Exemplo de aplicação: com uma imagem de 11 bits de um satélite com resolução espacial de 0,5 m (WorldView-2) é possível analisar a diferenciação das tonalidades da vegetação (níveis de cinza) em uma área de mata, facilitando identificar um veículo ou a existência de um acampamento em meio a mata, se não muito densa. Entretanto se o objetivo for apenas delimitar, em termos gerais, os tipos de elementos existentes no "terreno" da área de operações, uma imagem de 8 bits com resolução espacial de 30 m (LANDSAT) atenderá a esta demanda, utilizando menos recursos computacionais.

5.5.6. Resolução espectral (rs):

5.5.6.1. A resolução espectral está associada a três parâmetros:

- Número de bandas espectrais (quantidade de "cores")
- Posição de cada banda no espectro eletromagnético ("cor" central de cada banda)
- Largura de cada banda (extensão da faixa de "cores" aceita naquela banda)

5.5.6.2. Dos três parâmetros acima citados, o número de bandas espectrais é o único que tem relação com o volume de dados e, consequentemente, com a taxa de transmissão de dados (Tx). A variação da taxa de transmissão de dados está diretamente relacionada com a variação do número de bandas espectrais. A inclusão de uma quinta banda espectral implica no aumento de 25% na taxa de transmissão de dados.

$$k1 \text{ bandas espectrais} \rightarrow \text{Tx}$$

$$k2 \text{ bandas espectrais} \rightarrow \text{Tx'}$$

$$\text{Tx'} = k2/k1 * \text{Tx}$$

5.5.6.3. Utilizando a constelação Spot como exemplo: o Spot-1 tinha 3 bandas espectrais, com resolução espacial de 20m, resolução radiométrica de 8 bits e taxa de transmissão Tx. O Spot-2 passou para 4 bandas espectrais, com a mesma resolução espacial de 20m e a mesma taxa de transmissão Tx. Para compensar o aumento no número de bandas espectrais houve uma redução na resolução radiométrica para 6 bits. Sintetizando-se:

$$3 \text{ bandas} \times 8 \text{ bits} = 4 \text{ bandas} \times 6 \text{ bits}$$

5.5.6.4. Apesar de apenas o primeiro parâmetro influenciar a taxa de transmissão, os três parâmetros são fundamentais para caracterizar alvos na imagem. Ou seja, quanto mais bandas espectrais, quanto mais estreitas as bandas, e quanto mais distribuídas pelo espectro eletromagnético elas estão, maior será o poder de discriminar diferentes alvos.

5.5.6.5. A interação da onda eletromagnética com o alvo apresenta diferentes respostas em cada faixa do espectro, em termos de absorção, espalhamento e reflexão da onda, em função das características físicas destes alvos. Este conjunto de diferentes respostas nas diversas faixas espectrais atende pela assinatura espectral do alvo. As assinaturas podem ser semelhantes para um limitado conjunto de bandas e únicas para um extenso conjunto delas (LORENZETTI, 2015).

5.5.6.6. O maior obstáculo para a melhora da resolução espectral é a falta, no mercado, de fabricantes de barras de detectores que atuem nas diferentes faixas do espectro eletromagnético. Há também a dificuldade das janelas de observação atmosféricas, possibilitando que um sensor orbital seja impactado somente pelos comprimentos de onda que, de acordo com suas características físicas intrínsecas, sejam capazes de romper a atmosfera terrestre rumo ao espaço, ao menos na altitude de órbita do sensor.

5.5.7. Resolução temporal (rt):

5.5.7.1. A resolução temporal é definida pelo intervalo de tempo necessário para que o sensor cubra a superfície terrestre para qual ele foi projetado. Ela não deve ser confundida com a capacidade de revisita, obtida por meio de manobras do satélite.

5.5.7.2. Estas manobras, que pioram a resolução espacial do sensor e trazem distorções geométricas intensas, são úteis para aplicações militares; monitoramento de pequenas áreas; completar o imageamento em áreas com incidência de nuvens, entre outros. Mas não são eficientes para imageamento de grandes extensões de áreas, nem para imageamentos com alta frequência temporal.

5.5.7.3. A resolução temporal (rt) guarda, de forma indireta, uma relação com a taxa de transmissão de dados (Tx). Elas são inversamente proporcionais. Quanto maior a resolução temporal (maior o tempo necessário para cobrir a superfície terrestre), menor será a taxa de transmissão de dados.

5.5.7.4. Os satélites de alta resolução espacial apresentam resoluções temporais mais desfavoráveis, de alguns meses, que são amenizadas pela capacidade de revisita,

que podem ser de dias, através das manobras de imageamento oblíquo (off-nadir).

5.5.7.5. A forma mais eficiente de se reduzir a resolução temporal é com o uso de constelação de satélites. A resolução temporal da constelação (rt_c) é a resolução temporal de um satélite dividido pelo número de satélites (N_s) da constelação. A redução da resolução temporal aumenta a probabilidade de se obter imagens livres de nuvem, o que favorece muito o monitoramento tempestivo.

5.5.7.6. Exemplificando na prática, em uma região hipotética com 90% de probabilidade de ocorrência de nuvem perto de meio dia – o que não é tão raro em algumas regiões amazônicas –, o satélite Landsat-8, ao longo de um ano, encontrará uma probabilidade de 10% de ter todas as suas imagens nesta região coberta com nuvem. Em uma constelação com cobertura diária, a probabilidade do mesmo fato ocorrer é de apenas 4% em 1 mês e de 1% em 40 dias.

5.6. NÚMERO DE SATÉLITES EM UMA CONSTELAÇÃO

5.6.1. Como a melhora na resolução espacial provoca uma redução na largura da faixa imageada e, consequentemente, uma piora na resolução temporal (rt), o aumento na quantidade de satélites pode compensar a degradação desses parâmetros, evitando-se visadas oblíquas.

5.6.2. Por exemplo, considere um satélite de alta resolução espacial que apresente uma largura de faixa de imageamento de 30km e resolução temporal de 90 dias. Uma constelação de 30, 45 ou 90 satélites (N_s) ampliaria a largura da faixa imageada equivalente (porém, não contínua) para 900, 1350 ou 2700km (L_c).

$$L_c = L \cdot N_s$$

5.6.3. A consequência direta seria a redução da resolução temporal, respectivamente, para 3, 2 e 1 dia (T_c), pressupondo uma distribuição orbital ideal.

$$T_c = T / N_s$$

5.6.4. Estas mesmas constelações conseguiriam, com os satélites atuando em conjunto, enviar 30, 45 ou 90 vezes mais dados, funcionando como um sistema de alta taxa de transmissão de dados.

$$Tx_c = Tx \cdot N_s$$

5.6.5. **Exemplo:** para o cálculo de um número mínimo de satélites em uma constelação para se ter imagens de 5 metros de resolução de todo território nacional, assume-se a premissa de que as barras de detectores de menor custo e frequentemente usadas nos sensores espaciais apresentam 6.144 detectores (pixels). Assim tem-se as constantes:

5.6.6. A resolução espacial pretendida:

$$R_e = 5\text{ m}$$

5.6.7. O número de detectores disponível no sensor:

$$N_d = 6.144$$

5.6.8. O raio da terra:

$$R_t = 6.378,14\text{ km}$$

5.6.9. O período orbital em minutos:

$$P = 96\text{ min}$$

5.6.10. A partir dessas constantes, a largura da faixa de imageamento de cada satélite será:

$$L = R_e \cdot N_d = 5\text{ m} \cdot 6.144 = 30,72\text{ km}$$

5.6.11. Considerando que as faixas têm que se sobrepor em um percentual mínimo para que seja possível alinhar com precisão as faixas entre si, considerando como suficiente apenas 720m de sobreposição (menos de 2,4%), o valor reduzido de L passa a ser:

$$L = 30\text{ km}$$

5.6.12. Por conta do movimento de rotação da Terra, as órbitas consecutivas de aquisição de imagens estão distantes entre si, conforme Figura 4, que mostra a distribuição das órbitas ao longo do equador.

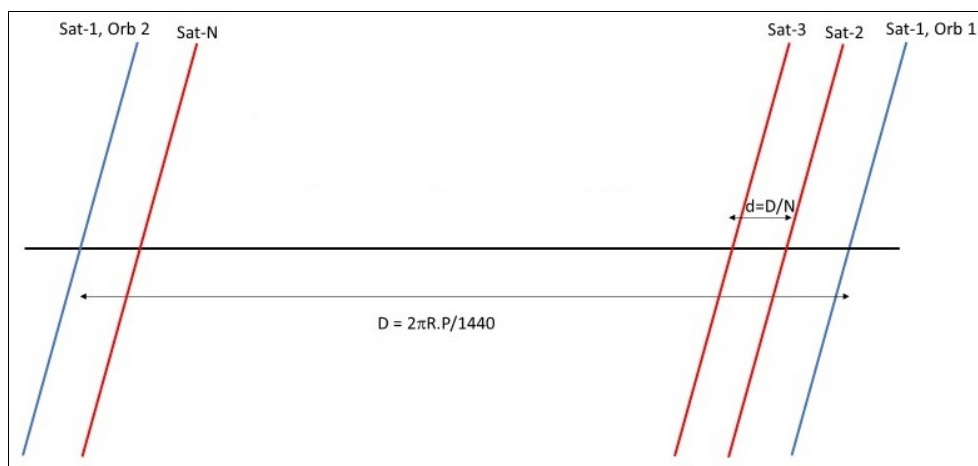


Figura 4: Movimento sincronizado de uma constelação de satélites, mostrando o espaçamento entre órbitas de uma constelação de N satélites. Duas órbitas do satélite 1 são mostradas.

5.6.13. A distância em solo entre as faixas ao longo da linha do equador será:

$$D = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_t \cdot P}{1.440}$$

$$D = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_t \cdot P}{1.440} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 6.378,14 \cdot 96}{1.440} = \frac{3.847.203}{1.440} = 2.671,67\text{ km}$$

5.6.14. Com isso, temos que o número mínimo de satélites na constelação, para que essa distância seja reduzida a um valor igual ou inferior à largura da faixa de imageamento L , deverá ser de:

$$N_s = \frac{D}{L} = \frac{2.671,67}{30} = 89\text{ satélites}$$

5.6.15. Neste exemplo, para garantir a cobertura diária de grandes áreas geográficas – como, por exemplo, o Estado da Bahia, o Pantanal, a Amazônia e/ou o Brasil –, com resolução espacial igual ou melhor a 5m, necessita-se de constelação que disponha de pelo menos 89 satélites, sem contar os satélites reserva para garantir o mínimo de 89 satélites ativos. Considerando-se as premissas acima descritas.

5.6.16. De forma geral, três fundamentais premissas aplicam-se ao caso em tela, qual seja: imageamento diário de todo o território brasileiro, o qual se encontra distribuído equatorialmente; imageamento com alta resolução, considerando-se assim resoluções espaciais de até 5m; e imageamento o mais próximo do nadir possível, evitando visadas oblíquas e, com isso, garantindo menos distorções geométricas e boas condições de iluminação, de forma a permitir processamentos digitais mais sofisticados como detecção de mudanças (change detection), dentre outros.

5.6.17. Uma outra forma de cálculo e não assumindo a premissa em relação à capacidade do sensor óptico a ser utilizado. Nessa situação, teríamos satélites de maior custo quanto maior a altitude e maior o campo de visão. A fórmula apresentada na Figura 5 pode ser utilizada para se calcular o número de satélites para o imageamento na região equatorial para condições diferentes de altitude e campo de visão. Esta fórmula permite avaliar constelações existentes e planejadas quanto à possibilidade de atendimento dos requisitos:

$$v_{\text{equador}} = \frac{2\pi R_{\text{equador}}}{T_{\text{rotação}}}$$

$$d_{\text{equador}} = v_{\text{equador}} P$$

$$f = \frac{L}{d_{\text{equador}}}$$

$$N = \left\lceil \frac{1}{f} \right\rceil$$

$$\text{simplificando: } N = \left\lceil \frac{27,83 \times P_{\text{min}}}{L_{\text{km}}} \right\rceil$$

L : swath ao longo da órbita
 R_{equador} : raio da Terra no equador (6.378.137 m)
 $T_{\text{rotação}}$: período de rotação da Terra (dia solar ou sinódico) (86400 s)
 v_{equador} : velocidade linear da superfície no equador ($\approx 463,8$ m/s)
 d_{equador} : deslocamento do ponto na superfície da terra na orientação nadir ao longo do equador após uma órbita
 P : período orbital do satélite
 f : fração do equador coberta por um satélite
 N : quantidade mínima de satélites para cobertura integral do equador em um dia.

Figura 5: Fórmula e parâmetros necessários para cálculo do número de satélites necessários ao imageamento na região equatorial.

5.6.18. A Tabela 2 demonstra a aplicação da fórmula na Figura 5 aos parâmetros de satélites reais e simulados para verificar a quantidade de satélites necessários em cada configuração. As fórmulas permitem estimar a quantidade mínima de satélites em cada configuração orbital e de instrumentação. Os satélites simulados servem como exemplo de aplicação da fórmula a outros satélites e constelações não mencionados aqui ou que possam vir a existir no futuro.

Tabela 2: Parâmetros de satélites reais e simulados com aplicação das fórmulas na figura 5 no cálculo do tamanho da constelação para cobertura diária .

Nº	Satélite	Altitude média	Período	Swath	Campo de visão	Melhor Resolução espacial	Custo corrigido estimado para construção de cada satélite	Tamanho da constelação		Referências
								Existente	Necessária para cobertura diária	
1	Sentinel 2A	786km	100.6min	290km	21,3°	10m	R\$ 1.3 bi	1	10	[1] - Não atende a resolução es]
2	Cbers 04A	629km	97.2min	92km	8,4°	2m	R\$ 320 mi	1	30	[2]
3	WorldView-3	617km	97.0min	13km	1,2°	0.31m	R\$ 2.5 bi	1	208	[3]
4	SkySat-C2	457km	93.6min	7km	0,9°	0.8m	R\$ 18 mi	15	373	[4]
5	Flock 4y (Planetscope)	501km	94.5min	32,5km	3,7°	3.7m	R\$ 2.4 mi	130	81	[5]
6	RapidEye 1 a 5	600km	96.3min	77km	7,4°	6.5m	R\$ 440 mi	5	35	[6] - Não atende a resolução es]
7	Spot 5	822km	101.4min	80km	5,6°	2.5m	> R\$ 3 bi	1	36	[7]
8	GAOFEN 2 (GF-2)	631km	97.3min	45,3km	4,1°	0.81m	?	1?	60	[8]
9	Jilin-1 Gaofen 3B	535	93.5min	17	1,8°	1m	?	<44	154	[9]
10	Jilin-1 Gaofen 3D	535	93.5min	17	1,8°	0.75	?	<44	154	[10]
11	Jilin-1 Gaofen 06A	535 (?)	93.5min(?)	25 (?)	2,7°	0.75 (?)	?	<44	105	[11]
12	SIM 798km 8° fov	798km	100.6min	111km	8°	5m	\$\$\$	-	26	simulação
13	SIM 617km 8° fov	617km	97.0min	86km	8°	5m	\$\$	-	32	simulação
14	SIM 457km 8° fov	457km	93.6min	64km	8°	5m	\$	-	41	simulação

Referências específicas para esta tabela:

<https://geoawesome.com/demystifying-satellite-data-pricing-a-comprehensive-guide/>
 [1] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/satellite-description>
<https://sentinewiki.copernicus.eu/web/s2-mission>
https://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/GMES_Sentinel-2_satellite_contract_signed
 [2] <https://www.gov.br/inpe/pt-br/programas/cbers/sobre-o-cbers-1/cbers-04a/cameras-imageadoras>
<https://www.gov.br/inpe/pt-br/acao-a-informacao/perguntas-frequentes/cbers/quanto-custou-a-missao-do>
 [3] <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/worldview-3/>
<https://spacenews.com/digitalglobe-awards-307m-contracts-worldview-3-satellite/>
<https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1208208/000155837017001064/dgi-20161231x10k.htm>
 [4] <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/skysat-2/>; <https://earth.esa.int/web/guest/-/skysat-full-archive-and-new-tasking>;
<https://sustainability.e-shape.eu/economics-behind-satellite-megaconstellations/>
<https://earth.esa.int/eogateway/missions/skysat/objectives>
 [5] <https://developers.planet.com/docs/data/planetscope/>
<https://sustainability.e-shape.eu/economics-behind-satellite-megaconstellations/>
<https://www.bloomberg.com/news/features/2017-06-29/the-tiny-satellites-ushering-in-the-new-space-revolution>
 [6] https://www.planet.com/products/satellite-imagery/files/1610.06_Spec%20Sheet_Combined_Imagery_Product_Letter_ENGv1.pdf
https://assets.planet.com/docs/Planet_PSScene_Imagery_Product_Spec_letter_screen.pdf
<https://developers.planet.com/docs/apis/data/sensors/>

<https://www.iafastro.org/assets/files/publications/highlights/2008-highlights-in-space.pdf>
 [7] https://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r329_9_spotsatellitetechnicaldata_en_sept2010.pdf
<https://spacenews.com/39234france-to-make-older-spot-images-available-to-researchers-for-free/>
 [8] <https://www.eoportal.org/satellite-missions/gaofen-2>
 [9] <https://www.eoportal.org/satellite-missions/jilin-con#spacecraft>
<https://in-the-sky.org/spacecraft.php?id=46454>
 [10] <https://www.eoportal.org/satellite-missions/jilin-con#spacecraft>
<https://in-the-sky.org/spacecraft.php?id=46456>
 [11] https://english.www.gov.cn/news/202306/15/content_WS648abd23c6d0868f4e8dce1c.html
<https://www.eoportal.org/satellite-missions/jilin-con#jilin-constellation>

5.6.19. Para ambas as formas de cálculo, as constelações com número inferior de satélites ao estimado não atenderão ao requisito de resolução temporal de 1 dia. Ressalta-se que tanto a forma simplificada quanto detalhada são estimativas conservadoras, que não levam em consideração sobreposição de imagens e outras ineficiências, ou seja, a quantidade de satélites será, com certeza, maior que esse mínimo se incluídos tais fatores.

5.6.20. O fato de haver uma constelação de satélites ao invés de um único satélite não melhora, diretamente, as resoluções radiométrica e espectral. A configuração em forma de constelação, no entanto, propicia uma maior taxa de transmissão de dados e, indiretamente, permite projetar sistemas espaciais com melhorias nestes parâmetros. Assim as constelações melhoram os parâmetros que caracterizam um Sistema Espacial de Observação da Terra. Elas podem, de forma simplificada, ser sincronizadas, de forma que os satélites se distribuem em intervalos iguais dentro de uma mesma órbita. Desta forma, todos os satélites cruzam o Equador na mesma hora local.

6. CONCLUSÃO

6.1. Conforme o estado da arte dos sistemas espaciais atuais, a tecnologia disponível em termos globais, e com base na literatura técnico-científica que fundamenta esse estudo, **para garantir a cobertura diária de grandes áreas geográficas – como a Amazônia e/ou o Brasil –, com resolução espacial igual ou melhor a 5m, estima-se que uma constelação necessita:**

a) utilizando o método de cálculo simplificado:

I - de ao menos **89 satélites de muito baixo custo** (câmera e equipamentos de baixo custo e satélite com muito pouca massa, provavelmente nanosatélites).

b) utilizando o método de cálculo detalhado com satélites específicos:

I - de ao menos **26-36 satélites de custo maior** (SIM 798km 8° fov, Spot 5);

II - de ao menos **30-32 satélites de custo médio** (SIM 617km 8° fov, CBERS 4A); ou

III - de ao menos **41 satélites de baixo custo** (SIM 457km 8° fov).

c) pelas simulações, **não faz sentido considerar constelações sol-síncronas com menos de 26 satélites**, tendo em vista a simulação com campo de visão extremamente generoso e órbita alta (item 12 da tabela 2).

6.2. Todas essas estimativas assumem várias premissas e desconsideram o uso de satélites redundantes para caso de necessidade de substituição de eventual equipamento defeituoso em órbita (ex: manter equipamento backup já em órbita).

6.3. A indústria espacial está passando por um momento de extrema mudança. Paradigmas estão sendo quebrados e soluções, antes inimagináveis, hoje se tornam realidade. A tão falada “New Space Industry” se impõe, desta vez com forte investimento privado. Soluções que antes eram realizadas no satélite hoje são executadas pelo segmento solo, e isso permitiu uma redução significativa nos custos de construção dos satélites.

6.4. As demandas atuais requerem uso de séries temporais, análise de grandes áreas, respostas em curto espaço de tempo. Os avanços computacionais permitem a implementação de novos processos, modelos e algoritmos que satisfazem estas necessidades. O gargalo se encontra no segmento espacial, de forma que novas empresas estão em uma corrida para atender às necessidades desse nicho.

7. REFERÊNCIAS

- AIRBUS SPACE & DEFENCE INTELLIGENCE. **SPOT 6 & SPOT 7 Imagery User Guide**. <https://www.intelligence-airbusds.com/en/8718-user-guides> (acessado em 14/04/2025).
- BAÛ, G.; CELLETTI, A.; GALES, C. B.; GRONCHI, G. F.; **Satellite Dynamics and Space Missions**, 1st Edition, Springer, 2019.
- CURTIS, H. D. **Orbital Mechanics for Engineering Students (Aerospace Engineering)**, 4th Edition, Elsevier, 2020.
- DIXON, Barnali; UDDAMERI, Venkatesh. **GIS and Geocomputation for water resource science and engineering**. 1. ed. Oxford: John Wiley & Sons, 2016. 504p. ISBN 978-1-118-35414-8.
- FLORENZANO, T. G.; **Iniciação em Sensoriamento Remoto**, 3ª. Edição, Oficina do Texto, 2011.
- FORTESCUE, P.; SWINERD, G.; STARK, J.; **Spacecraft Systems Engineering**, 4th Edition, Wiley, 2011.
- GOLKAR, A.; **New Space Industry, Introduction to Rocket and Satellite Engineering**, Skoltech Institute of Science and Technology, Moscow, Russia, 2020.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E.; **Digital Image Processing**, 4th Edition, Pearson, 2020.
- JENSEN, J. R. **Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective**. 2nd Edition, Prentice Hall; 2006.
- KRAMER, H. J.; **Observation of the Earth and its Environment. Survey of Missions and Sensors**, 4th Edition, Springer Verlag, 2002.
- LANDSAT SCIENCE. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-1-2/>
- LIU, W. T. H.. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. 2ª. Edição, Oficina do Texto, 2015.
- LORENZZETTI, J. A. **Princípios físicos de sensoriamento remoto**. 1ª. Edição, Editora Blucher, 2015.
- MACHADO & SILVA, A. J. F. **Geometria de imagens: do projeto do satélite à geração dos produtos**. Tese de doutorado, INPE, 2007.
- MAXAR. **WorldView-3 Data Sheet**. <https://www.maxar.com/>
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 4ª. Edição, Editora UFV, 2011.
- PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. G.; **Digital Signal Processing**, 4th Edition, Pearson, 2007.
- SEBESTYEN, G.; FUJIKAWA, S.; GALASSI, N.; CHUCHRA, A.; **Low Earth Orbit Satellite Design**, 1st Edition, Space Technology Library, 2018.
- SHAMSI, Uzair M. **GIS applications for water, wastewater, and stormwater systems**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2005. 440p. ISBN 978-0849320972.
- WELTI, C. R., **Satellite Basics for Everyone: An Illustrated Guide to Satellites for Non-Technical and Technical People**, 2012.
- WERTZ, J. R.; LARSON, W. J.; **Space Mission Analysis and Design**, 3rd Edition, Space Technology Library, 2019.
- https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_PT/SEMPSCBE8JG_0.html (acessado em 14/04/2025) (ESA,1)
- http://www3.inpe.br/snct2015/arquivos/Clima_Espacial_Satelites_Aplicacoes_OBT.pdf (acessado em 14/04/2025) (INPE, 1)
- <http://www.inpe.br/crc/> (acessado em 14/04/2025) (INPE, 2)
- <http://www.dgi.inpe.br/> (acessado em 14/04/2025) (INPE, 3)
- <https://www.thespacelist.space/info> (acessado em 14/04/2025)

Brasília, DF, 8 de abril de 2025.

DANIEL ARAÚJO MIRANDA
Perito Criminal Federal
SEGEO/INC/DITEC/PF

Revisor:

CRISTIANO DA CUNHA DUARTE
Perito Criminal Federal
SEGEO/INC/DITEC/PF



Documento assinado eletronicamente por **DANIEL ARAUJO MIRANDA, Perito(a) Criminal Federal**, em 12/05/2025, às 18:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **CRISTIANO DA CUNHA DUARTE, Perito(a) Criminal Federal**, em 03/06/2025, às 18:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei4.pf.gov.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0&cv=40439845&crc=317501A8.

Código verificador: **40439845** e Código CRC: **317501A8**.