

Sensoriamento remoto utilizando radares SAR embarcados em satélites: Princípios básicos, tecnologias, desempenho e aplicações em satélites que operam em bandas L, C e X

Pedro Henrique Santos¹

¹Universidade de São Paulo, (USP)/SP – Brasil

Resumo – O Sensoriamento Remoto utilizando Satélites Radares de Abertura Sintética (SAR) ganhou espaço nos últimos anos, e tal fato se dá, devido aos avanços tecnológicos e vantagens atribuídas ao RADAR na aquisição de dados. Logo, este trabalho descreve os fundamentos de um sistema RADAR SAR, onde o devido conhecimento de suas funcionalidades e limitações permitem a otimização e o maior rendimento do sistema, fornecendo dados que sejam coerentes com a cena avaliada. Contudo, foram apresentados trabalhos que utilizaram bandas L, C e X, em radares SAR embarcados em satélites, para o sensoriamento remoto voltado a avaliação da biomassa acima do solo, com objetivo de demonstrar que a banda de operação deve ser escolhida de forma criteriosa, para obtenção de resultados concisos com a cena analisada.

Palavras-Chave – Sensoriamento Remoto, RADAR SAR, Bandas de operação.

I. INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto voltado ao monitoramento terrestre fornece informações relevantes sobre o estado atual da superfície, onde o devido tratamento dos dados providos dos sistemas sensores embarcados em satélites, permite a criação de estratégias que possam otimizar os recursos naturais provenientes da mesma, como por exemplo, no manejo da agricultura, bem como, no monitoramento de florestas, auxiliando assim na prevenção de desmatamentos e queimadas, com a devida indicação de regiões que possuem altos índices de retiradas da biomassa presente em uma determinada região analisada [1].

Sistemas SAR embarcados em satélites, podem fornecer dados que, devidamente tratados, permitem informações relevantes sobre as regiões imageadas, e o maior tempo de revisita destes sistemas sobre a área imageada, possibilita uma maior quantidade de dados, e com isso, a qualidade e precisão das imagens obtidas pelo sensor após o processamento dos sinais, podem ser significativamente melhoradas [2].

Radares do tipo SAR, são sistemas ativos, isso indica que os mesmos operam fornecendo um sinal eletromagnético para o meio durante o instante que permanece sobre a cena. Tal característica intrínseca a sistemas ativos, permite maior destaque para o monitoramento terrestre que utiliza radares, pois o mesmo, pode operar em diferentes cenários, como por exemplo, em situações onde a cena esteja sobre a influência de nuvens, em períodos de chuva ou sem a presença de luz no ambiente. Este destaque é um dos fatores que justificam o investimento em radares, pois sistemas de monitoramento

passivos, como as câmeras embarcadas em satélites, a cena necessita estar iluminada e em presença de chuva ou nuvem, as imagens são comprometidas, e em alguns casos, impossibilitam a formação de uma imagem que represente a região imageada [1].

Os avanços voltados a tecnologia de dispositivos semicondutores, em conjunto com as pesquisas e desenvolvimentos de modos de operação dos sistemas, possibilitaram a redução dos custos, diminuição dos sistemas e conseqüente redução do peso e volume dos módulos de Transmissão e Recepção dos sinais produzidos no front-end dos radares [3]. Tais avanços, também permitiram que os módulos de transmissão e recepção fossem implementados em plataformas menores, como por exemplo, em um projeto da Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA), para uma implementação voltada a cubesats 6u, descritas em [4].

Outro fator de destaque foram os avanços em materiais que compõe os refletores que são frequentemente utilizados em projetos de radares para se aumentar a abertura da antena, onde trabalhos recentes, como os apresentados em [5], podem otimizar consideravelmente a abertura e a resolução do RADAR.

Radares de Abertura Sintética que operam no sensoriamento remoto terrestre, comumente utilizam as bandas L, C e X, nas frequências compreendidas entre (1 à 2)GHz, (4 à 8)GHz e (8 à 12)GHz respectivamente[3][25]. Trabalhos recentes, utilizam um radar SAR que opera em banda S, e segundo os autores, serve como alternativa complementar para as bandas L, C e X, bem como, na vigilância marítima, e os detalhes podem ser vistos em [25]. As bandas de operação dos radares para o monitoramento devem ser definidas na etapa de projeto, onde algumas considerações devem ser analisadas com critérios específicos, isso para que o rendimento do sistema seja otimizado e possa contemplar todas as feições da cena avaliada, onde os sensores embarcados nas plataformas devem fornecer uma resolução que justifique os objetivos da missão, isso em condições de ausência de iluminação natural e também em situações onde ocorra a presença de nuvens ou mudanças climáticas no ambiente a ser caracterizado, com isso, o aumento considerável da resolução geométrica requerida e a demanda para grandes larguras de faixa se tornam desafios a serem sanados durante a etapa de projeto do sistema [6] [13].

Contudo, o trabalho teve como objetivo, a apresentação de conceitos e técnicas utilizadas para sanar algumas limitações encontradas em sistemas radares SAR. Foram apresentados trabalhos que descrevem a eficácia dos sistemas

SAR em aplicações voltadas ao sensoriamento remoto terrestre, onde a descrição do uso de sistemas SAR em diferentes cenários, permite o avanço em pesquisas e o desenvolvimento de novos sistemas que possam garantir a eficiência e otimização no sensoriamento remoto terrestre à partir de plataformas orbitais embarcadas em satélites.

Pedro Henrique Santos, pedroheng@gmail.com.br.

A. DESCRIÇÃO DOS RADARES SAR

1) *Funcionamento de um RADAR SAR:* Durante o deslocamento da plataforma do satélite ao longo de sua trajetória o RADAR opera emitindo ondas eletromagnéticas pulsadas para o meio ambiente e estes pulsos atingem os alvos da cena. Após os pulsos encontrarem um alvo, o sinal é retroespalhado e retorna ao sistema RADAR, onde o mesmo irá realizar a conversão analógico/digital e com isso armazenar os dados para o devido processamento [7]. Sendo assim, alguns fatores devem ser considerados e podem ser reunidos na equação que descreve de forma sistemática o RADAR.

2) *Equação de alcance do RADAR:* Considerando uma antena isotrópica, a Equação 1, é amplamente aceita e descrita para a análise de desempenho de sistemas radares.

$$SNR = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma_n}{(4\pi)^3 k_B T_e B F L R^4} \quad (1)$$

A definição dos parâmetros de interesse, são apresentados na Tabela 1, como segue.

TABELA 1. DESCRIÇÃO E DEFINIÇÃO DA EQUAÇÃO DO RADAR

P_t	G^2	λ^2	σ	k_B	T	B	F	L	R
Potência transmitida	Ganho da antena	Comprimento de onda	Seção reta do alvo	Constante de Boltzmann	Temperatura do sistema	Largura de banda do sistema	Figura de ruído	Perdas consideráveis	Alcance Até o alvo

Observando a Tabela 1, podemos perceber que um sistema RADAR pode determinar o alcance com base no ganho da antena, potência de transmissão, largura de banda, figura de ruído e seção reta do alvo, índice este que é de grande importância, pois indica a razão entre a potência refletida pelo alvo em função da densidade de potência enviada pelo RADAR [8].

Com a devida observação destes parâmetros, a eficiência do sistema pode ser obtida, e o alcance máximo de detecção do RADAR pode ser definido, bem como outros parâmetros que são estabelecidos à partir dos requisitos da missão na qual será utilizada. A configuração geométrica de um RADAR permite a análise de outros parâmetros que são úteis para a compreensão sistêmica do RADAR.

3) Geometria do RADAR SAR:

A Figura 1, demonstra a geometria simplificada do RADAR SAR, onde são reunidos alguns dos parâmetros que devem ser analisados no sistema e que serão brevemente descritos.

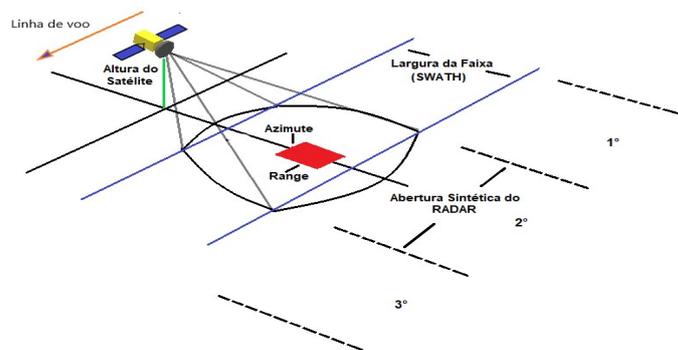


Figura 1. Geometria do RADAR SAR. Fonte autor.

O projeto de um sistema RADAR se inicia com a devida observação de requisitos inerentes à missão, onde deve ser avaliado a altura da órbita, a frequência de operação, o ângulo de incidência, largura de faixa de cobertura, resolução, dentre outros. A avaliação detalhada destes parâmetros, pode garantir que o sistema seja otimizado e com isso realize de forma adequada sua função quando em operação[3].

A resolução pode ser descrita como a menor distância entre dois alvos na qual um RADAR consegue identificá-los e realizar a distinção entre eles dentro de uma cena imageada [6]. Com isso, as equações que descrevem as resoluções em azimute e em range são apresentadas, e em sequência alguns avanços que permitiram uma melhor otimização das mesmas em sistemas radares modernos.

4) Resolução em azimute:

Considerando um RADAR de abertura real, com foco em um ponto determinado, a resolução em azimute (δ_a), pode ser conseguida segundo a Equação 2, descrita em [9].

$$\delta_a = \frac{d_a}{2} \quad (2)$$

Onde d_a indica a abertura horizontal da antena utilizada no RADAR.

4) Resolução em range:

A resolução em range de um RADAR é definida em termos da largura do pulso. Quando não se utiliza a compressão do pulso, a largura de banda do receptor é casada com a largura de banda do pulso, com isso uma relação pode ser estabelecida como na Equação 3.

$$\delta_R = \frac{c \tau}{2} = \frac{c}{2B} \quad (3)$$

Para se conseguir uma resolução em range fina, é necessário fazer com que o pulso emitido seja muito curto, isso implica em reduzir a potência média transmitida, porém isso limita alguns requisitos de operação relativos à largura de banda do sistema [8].

Para se conseguir alcançar eficiência na resolução utilizando pulsos ultracurtos, e com a potência média

adequada, os radares modernos utilizam a técnica de compressão do pulso, onde uma modulação em frequência ou em fase, permitem a modificação da largura do pulso, descrita na Equação 3 [6].

A frequência de operação, comprimento de onda e o tipo de antena são critérios de projeto a se observar, isso para a devida classificação a ser adotada para o tipo de RADAR, e isso está diretamente associada pela missão que a mesma irá realizar [1].

Os radares modernos possuem antenas com uma matriz de fase, que podem ser formados por dois ou mais irradiadores. A matriz de antenas permite a sintetização de um feixe diretivo estreito, sendo que o mesmo, pode ser direcionado eletronicamente, à partir da variação de fase, ou da corrente elétrica que alimenta os elementos da matriz, permitindo assim a implementação de técnicas com a formação do feixe digital (DBF) [10]. Essa tecnologia, possibilita antenas com módulos de transmissão e recepção ativos, onde os modos de imageamento avançados como o Spotlight e o ScanSAR possam ser implementados, e com isso, seja permitido a seleção de diferentes alcances devido a flexibilidade do ângulo de incidência, sendo selecionado e direcionado de forma eletrônica, o que permite o aumento da largura de faixa e uma resolução considerável [10] - [11].

A técnica também permite que o RADAR opere utilizando multifunções, com isso, os modos de operação nos quais os radares modernos atuam, podem proporcionar a otimização do sistema para diferentes situações [5].

Outra vantagem da tecnologia, se dá na combinação da polarização do sinal na emissão e ou recepção, que permite a orientação da onda eletromagnética na configuração Horizontal (H) ou Vertical (V). Isso permite que outras análises do sinal retroespalhado sejam realizadas, e também, uma possível caracterização de objetos devido aos mecanismos de espalhamento ou absorção inerentes aos materiais [12].

Observando os dados apresentados na Tabela 2, para 54 satélites SAR contabilizados desde 1978 e com projeção até 2023, é possível perceber que as tecnologias voltadas a sistemas SAR que utilizam a tecnologia de matriz de varredura eletrônica (ESA), vem se destacando, e se encontra presente em 63% destes, seguido dos sistemas que operam com o uso de refletores 26% e também dos que usam matrizes planares, com 11%. Os dados referentes a cada satélite e o País de desenvolvimento, podem ser consultados em [5].

TABELA 2. DESENVOLVIMENTO E TECNOLOGIAS EM RADARES SAR

Total de satélites SAR contabilizados	Tecnologia utilizada		
	Matriz planar	Refletor	Matriz de varredura eletrônica (ESA)
54	6	14	34
	11%	26%	63%

A análise descrita, contabiliza desde o primeiro satélite com tecnologia RADAR SAR, até o estado da arte nesta tecnologia, conhecido como TanDEM-L, proposto e desenvolvido pela DLR.

As informações descritas permitem uma avaliação que demonstra que a devida observação das tecnologias emergentes e o estado da arte, fornecem ferramentas e atributos para que se alcance imagens com alta resolução e com menor tempo de revisita, onde configurações e alternativas viáveis como por exemplo a Frequência de repetição do pulso (PRF), podem fornecer a cobertura de uma faixa ampla, de forma contínua, e com uma resolução considerável, quando comparado com os sistemas que operam com o (PRF) fixo [10]. Logo, o sensoriamento remoto, se torna mais eficiente e preciso, requisitos necessários para que os dados sejam utilizados de forma concisa para a tomada de decisão em diferentes aplicações que utilizam radares do tipo SAR embarcados em satélites [1].

II. MODOS DE OPERAÇÃO DOS SISTEMAS SAR EM DESENVOLVIMENTO

Para que seja possível obter uma informação precisa da cena, é necessário que as imagens possuam uma alta resolução, onde a mesma pode ser reduzida para aplicações que não necessitem de uma precisão na resolução, mas, de uma ampla largura de faixa em pontos determinados da cena [13]. Os modos de operação com que os radares modernos podem ser configurados permitem uma flexibilidade nos modos de imageamento das cenas analisadas. Os mais comuns são demonstrados na Figura 2.

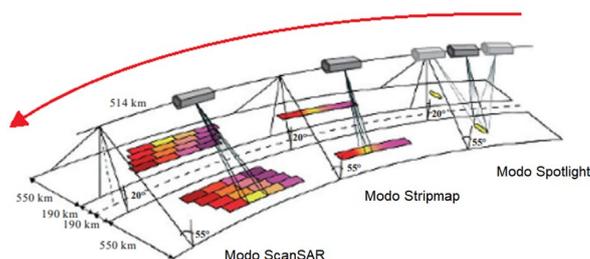


Figura 2. Modos de operação do RADAR SAR. Adaptado de [24].

Observando a Figura 2, no modo Spotlight, o direcionamento do feixe para um determinado alvo pode ser conseguido ao longo da trajetória do RADAR, este modo permite que uma maior quantidade de pulsos sejam enviados ao alvo, e com isso, é possível alcançar uma melhor resolução da imagem.

No modo Stripmap, o feixe é direcionado de forma fixa ao longo da trajetória do RADAR, e isso, irá gerar um mapa que será definido pela largura do feixe do RADAR, e que se estende na direção de voo da plataforma.

O modo ScanSAR, permite que uma ampla faixa seja obtida, porém, com uma resolução comprometida. Isso ocorre devido ao direcionamento do feixe do RADAR em diferentes pontos da cena e no sentido de voo da plataforma.

1) *Bandas de operação mais utilizadas para o monitoramento terrestre.*

O monitoramento terrestre realizado por radares, pode ser obtido por diferentes bandas. A relação entre a vegetação e o

comprimento de onda está intrinsecamente relacionada, onde cada tipo de vegetação possui uma determinada estrutura e com isso, a interação ocorre de forma diferente para cada comprimento de onda e em diferentes estágios de crescimento da cultura, e isso pode fornecer sinais com respostas diferentes [14]-[15]. As bandas mais utilizadas em sensoriamento remoto são brevemente descritas.

Radares que operam em banda L, possuem menor comprimento de onda, logo podem penetrar mais profundamente nas copas da vegetação e solos [13].

Radares que operam em banda C, possuem uma resolução intermediária quando comparado com os que operam em banda L e X. Os mesmos possuem a capacidade de penetrarem além da camada do dossel das plantas, porém, se limita nesta região, quando houver maior densidade da vegetação. Outra vantagem desta banda é que elas permitem que faixas mais amplas sejam imageadas e com isso reduz o tempo de revisita em escala global [13]-[15].

No caso de radares que operam na banda X, sua penetração no dossel é ainda mais limitada, e sua utilização é mais efetiva para o monitoramento da estrutura superficial do dossel das plantas [3].

A devida combinação dos comprimentos de onda dos radares pode fornecer informações úteis, das estruturas das florestas e vegetações e as pesquisas recentes serão abordadas com mais detalhes.

2) Radares que utilizam a tecnologia SAR nas bandas L, C e X.

Dentre os satélites radares do tipo SAR, o ALOS-PALSAR é um dos sistemas que utilizam a banda L, onde o mesmo possui uma matriz de fase e pode operar em diferentes polarizações, simples ou dupla. O mesmo pode fornecer um feixe estreito que permite ser direcionado eletronicamente. Outra possibilidade é a de se utilizar o modo ScanSAR, fornecendo uma ampla faixa, porém com a redução da resolução. Com uma antena relativamente pequena, o mesmo pode fornecer um alto PRF, e com isso, reduzir a potência do sinal emitido, e fornecer grandes larguras de faixa. Detalhes do mesmo, podem ser conferidos em [16].

Outras tecnologias e alternativas, são propostas por [17]. Neste caso, utilizando refletores em conjunto com uma matriz de alimentadores e que são amplamente descritas na literatura. A Figura (3), descreve o sistema exposto, onde os detalhes podem ser consultados em [17].

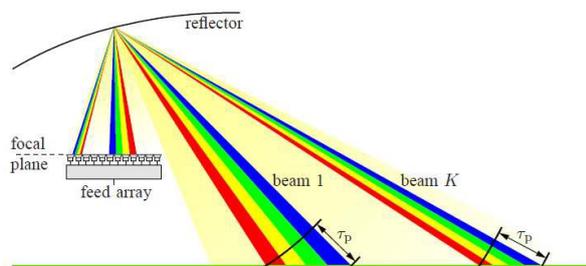


Figura 3. Sistema SAR usando matriz de alimentadores e refletor [17].

Neste caso, são necessários pulsos mais curtos na transmissão do sinal o que gera um trem de pulsos denominado chirp, onde o mesmo pode ser representado por uma série de Fourier exponencial, onde a largura de banda de operação do RADAR, é então casada com o tempo de interação do RADAR e com isso, haverá uma potência relativamente pequena, e um grande tempo de integração, quando se utiliza um alto PRF.

Uma proposta da (DLR) para uma missão operando em banda L, é considerada o estado da arte em radares SAR, descrita como missão Tandem-L, e que utiliza a combinação descrita por [17]. A missão visa a observação sistemática de processos dinâmicos na superfície da terrestre. Entre as aplicações estão, por exemplo, a estimativa de biomassa, sensoriamento remoto, monitoramento das atividades tectônicas, dentre outras. Tandem-L é composta por dois satélites idênticos, voando em formação, logo, pode ser utilizada para aquisições interferométricas [17].

Outro satélite SAR frequentemente utilizado no monitoramento global e projetado para operar em banda C, é o Sentinel-1. O mesmo possui a capacidade de operar no modo Stripmap e pode fornecer uma ampla faixa de cobertura utilizando o modo de aquisição TOPS SAR, que é idealmente o principal candidato para uma observação global. Este modo, permite o suporte interferométrico, que necessita que longas rajadas de sinal sejam emitidas. O sistema possibilita que um direcionamento do feixe da antena, em azimute, seja realizado, e também uma varredura eletrônica em elevação. Trabalhos realizados por [18], descrevem que neste modo, diferentes coberturas e resoluções podem ser obtidas, porém, ambiguidades em azimute, e uma relação sinal ruído variável, devem ser contabilizadas.

Um sistema satélite RADAR (SAR), que utiliza banda X e é amplamente utilizado é o Terra SAR-X, onde a tecnologia utilizada, permite que o mesmo opere nos três modos básicos: Spotlight, ScanSAR e StripMap e com alta versatilidade operacional, e com isso, o satélite permite que uma imagem da superfície possua resolução menor do que 1 [m].

Os sistemas presentes no Terra SAR-X, possuem tolerância a falhas simples, o que garante que o mesmo, possa operar dentro das especificações do projeto. Também pode fornecer duas polarizações, e possui uma matriz de alimentadores ativos, onde o feixe pode ser direcionado de forma eletrônica à partir da variação de fase, ou corrente do sinal, fornecendo configurações para melhor performance quando em operação. Um gerador de chirp, totalmente programável, fornece as formas de pulso e as larguras de banda para a formação do feixe [19].

III. APLICAÇÕES DOS SATÉLITES NO SENSORIAMENTO REMOTO E MONITORAMENTO TERRESTRE

A eficiência do radar ALOS-PALSAR, que opera em banda L, foi avaliada em trabalhos realizados por [12], onde descrevem a capacidade do mesmo para caracterizar florestas e mangues. Os autores relataram que o espalhamento do sinal, teve maior influência para dosséis abertos, com existência de troncos caídos no solo, galhos e árvores retorcidas. Uma influência da resposta do RADAR, também

ocorreu para variações na estrutura do dossel, e não somente em relação a altura das árvores avaliadas. O estudo também indicou que somente a avaliação dos modos de polarização selecionados, não fornece informações precisas para a discriminação dos diferentes tipos fisiográficos analisados, também foi sugerido que diferentes ângulos de incidência, e PRF,s, fossem testados para exploração dos parâmetros SAR, e com isso, estimar a biomassa nesta região de estudo.

Uma limitação para a devida estimativa de biomassa, ocorre devido a saturação do sinal de retroespalhamento, pesquisas realizadas por [23], descrevem que em banda L, a estimativa da biomassa se mostrou mais efetiva quando comparada com a banda C. Logo, os autores relataram que para menores comprimentos de onda, os resultados são mais efetivos.

Uma revisão bibliográfica realizada por [15], demonstrou que radares que operam em banda L, apresentam a melhor performance na estimação da biomassa quando comparados com a banda C, e também fornecem dados mais precisos. Essa afirmação implica nos resultados que encontrou em sua revisão, pois, segundo os autores, comprimentos de onda maiores, foram mais utilizados pelos pesquisadores para estimar florestas nas regiões do Brasil.

Estudos realizados por [14], utilizaram dados dos satélites TerraSAR-X e ALOS PALSAR para a avaliação de biomassa acima do solo. Os autores relataram que o retroespalhamento do sinal é mais sensível para a banda L, principalmente nas regiões com maior altura de cobertura, quando comparados com os dados da banda X. Os autores destacaram a importância da combinação entre as mesmas, pois no caso das áreas mais baixas analisadas, os dados foram imprecisos, e houve maior variância nos resultados, o que justifica a combinação com a banda X, que fornece resultados mais precisos em regiões que possuem solo, com pouca cobertura vegetal. Outro destaque relatado na pesquisa, foi que os resultados obtidos, podem ser utilizados para uma avaliação da distribuição espacial da biomassa, e a devida indicação de tendências, bem como uma possível caracterização de padrões espaciais em diferentes tipos de floresta.

III. CONSIDERAÇÕES

Com base na pesquisa realizada, foram reunidas algumas informações relevantes que permitem analisar o desempenho dos radares descritos. A Tabela 3, descreve alguns tópicos que foram abordados anteriormente.

TABELA 3. DESENVOLVIMENTO E TECNOLOGIAS EM RADARES SAR

Banda	Frequência	Satélite	Modo de Operação	Tecnologia	Trabalhos Avaliados
L	1 \diamond 2	Alos/ PALSAR	ScanSar Polarimetry Fine Resolution	ESA	[12]
					[23]
					[15]
C	2 \diamond 8	Sentinel	StripMap Extra Wide Swath Wave Interfero- métric	ESA	[23]
					[15]
X	8 \diamond 12	Terra SAR-X	SpotLight ScanSAR StripMap	ESA	[14]
					[15]

A Tabela 3, permite avaliar sistematicamente algumas informações relacionadas aos satélites pesquisados, e assim, estabelecer uma relação direta entre a teoria descrita e os resultados obtidos pelos pesquisadores. Com base nessas informações, pontos consolidados, e descritos na literatura, podem complementar as informações coletadas e servir de base para a etapa de projeto de novos sistemas SAR, bem como, fornecer suporte para novas pesquisas que busquem avaliar a superfície a partir de imagens SAR, fazendo com que, os problemas encontrados e descritos pelos pesquisadores, sejam sanados à partir das devidas observações da operação e funcionamento dos sistemas.

Considerando os radares de banda L, [20] descreve que os sinais dessa banda interagem menos com a vegetação rasteira, quando comparados às bandas C e X, isso se deve ao maior comprimento de onda do sinal da banda L. O sinal retroespalhado também sofre diferentes tipos de dispersão, sendo a dispersão direta causada pelo solo, a dispersão indireta e direta causada pelo dossel da cultura, e também uma combinação entre o solo, troncos e galhos, sendo que nesta combinação a resposta obtida é caracterizada por ser semelhante à resposta de refletores de canto artificiais, que são utilizados para calibração radiométrica de RADAR. Este fenômeno foi descrito no trabalho de [12], onde o autor descreve que houve grande influência na resposta quando a cena apresentava galhos e troncos espalhados.

A calibração do RADAR Sentinel-1, realizada por [20], demonstra que as atividades de calibração em órbita são extremamente importantes para a validação de instrumentos RADAR, permitindo a redução do tempo de comissionamento do satélite e também permitem prever com precisão as diferenças entre os padrões estabelecidos, proporcionando assim respostas mais precisas durante o tempo da missão. Estudos realizados por [22], também descrevem a viabilidade de observar os dados em diferentes missões, usando o RADAR ALOS/PALSAR, onde os autores descrevem que a análise adequada pode fornecer uma base para monitoramento de longo prazo, em relação à condição da superfície, demonstrando sua estabilidade radiométrica.

Os autores também relataram que os alvos naturais observados, eram compatíveis com os alvos artificiais usados para caracterização, como refletores de canto, e recomendam que objetos naturais podem ser usados para calibração do radar e monitoramento de estabilidade, durante o tempo da missão.

Portanto, a análise adequada dos dados apresentados pode fornecer informações que auxiliam na calibração contínua dos sistemas RADAR enquanto eles estão operando, garantindo assim uma resposta mais precisa à cena e reduzindo o tempo e o custo de calibração dos instrumentos. Os dados coletados também servem de base para projetos que visem a implementação de sistemas RADAR SAR embarcados em satélites, onde a otimização da missão a ser realizada deve observar os parâmetros descritos e assim avaliar o real interesse e objetivos a serem alcançados na missão e com isso, descartar aqueles que já demonstraram de forma teórica e prática quais os melhores cenários para sua adequada aplicação, direcionando assim os recursos para o melhor desempenho do sistema RADAR. A devida

observação das tendências tecnológicas voltadas aos satélites radares do tipo SAR, permitem que novos sistemas sejam desenvolvidos, baseados em experiências de sucesso já implementadas, com as modificações necessárias para a devida otimização e melhoria dos sistemas embarcados, fazendo com que, a missão cumpra com seus objetivos, e consiga devolver, os custos inerentes ao investimento em pesquisa, desenvolvimento e tecnologia, e que a longo prazo, justifiquem o tempo e os recursos dedicados a estas missões.

O trabalho demonstra que, a devida observação das informações relativas as bandas de operação do RADAR, podem fornecer dados mais precisos sobre a cena, isso faz com que, o sensoriamento remoto seja mais efetivo, onde as pesquisas apresentadas, demonstraram que, radares que operam em banda L, maior comprimento de onda, fornecem dados mais condizentes com a cena avaliada, isso quando a biomassa é mais alta e densa, quando comparado com a banda X, que possui menor comprimento de onda.

Também foi demonstrado que, o uso combinado de radares que operam em diferentes bandas, pode conferir maior precisão das estimativas, cobrindo assim grande parte das fases de crescimento da biomassa e também os diferentes tipos e formatos de vegetação, pois pode combinar as diferentes profundidades de penetração e também os ângulos de incidência do RADAR. As pesquisas também demonstraram que, o uso combinado de imagens como as avaliadas com o TerraSAR-X e ALOS PALSAR, podem fornecer estimativas mais precisas em toda a faixa de biomassa, pois pode ser realizado uma combinação da profundidade de penetração do sinal retroespalhado. Sendo assim, os estudos voltados a sistemas radares embarcados em satélites, com a combinação de diferentes bandas, como a banda S, descrita em [25], podem ser utilizados para pesquisas futuras, que visem a devida estimação de variáveis biofísicas presentes em diferentes culturas e também em estruturas mais densas, como florestas, onde os dados SAR se tornam relevantes para a modelagem da biomassa acima do solo, pois os erros são consideravelmente pequenos, quando comparado com outros métodos, e também, geram dados em regiões mais abrangentes e com maior precisão.

REFERÊNCIAS

- [1] LIU, Chang-an et al. Research advances of SAR remote sensing for agriculture applications: A review. *Journal of integrative agriculture*, v. 18, n. 3, p. 506-525, 2019.
- [2] JIANG Z, Chen Z, Chen J, Liu J, Ren J, Li Z, Li H. 2014. Application of crop model data imilation with a particle LIU Chang-an et al. *Journal of Integrative Agriculture* 2019, 18(3): 506–525 523 filter for estimating regional winter wheat yields. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7, 4422-4431.
- [3] KHORRAM, Siamak et al. *Principles of applied remote sensing*. Berlin/Heidelberg: Springer International Publishing, 2016.
- [4] PERAL, Eva et al. Radar technologies for earth remote sensing from cubesat platforms. *Proceedings of the IEEE*, v. 106, n. 3, p. 404-418, 2018.
- [5] WILLIAMS, John S. *Electronic scanned array design*. Institution of Engineering and Technology, 2020.
- [6] GEBERT, Nicolas; KRIEGER, Gerhard; MOREIRA, Alberto. Digital beamforming on receive: Techniques and optimization strategies for high-resolution wide-swath SAR imaging. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, v. 45, n. 2, p. 564-592, 2009.
- [7] SHIMADA, Masanobu. *Imaging from spaceborne and airborne SARs, calibration, and applications*. CRC press, 2018.
- [8] FREEMAN, Anthony et al. SweepSAR: Beam-forming on receive using a reflector-phased array feed combination for spaceborne SAR. In: 2009 IEEE Radar Conference. IEEE, 2009. p. 1-9.
- [9] SKOLNIK, Merrill I. *Radar handbook*. McGraw-Hill Education, 2008.
- [10] DE ALMEIDA, Felipe Queiroz et al. Multichannel staggered SAR: System concepts with reflector and planar antennas. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, v. 55, n. 2, p. 877-902, 2018. Boulic, R. and Renault, O. (1991) "3D Hierarchies for Animation", In: *New Trends in Animation and Visualization*, Edited by Nadia Magnenat-Thalmann and Daniel Thalmann, John Wiley & Sons Ltd., England.
- [11] MOREIRA, Alberto. Spaceborne Radar Technologies for Earth Remote Sensing. In: *Proceedings of the International Radar Symposium (IRS)*. German Institute of Navigation-DGON, 2007. p. 33-36.
- [12] DE SOUZA PEREIRA, Francisca Rocha; KAMPEL, Milton; CUNHA-LIGNON, Marília. Mangrove vegetation structure in Southeast Brazil from phased array L-band synthetic aperture radar data. *Journal of Applied Remote Sensing*, v. 10, n. 3, p. 036021, 2016.
- [13] FLORES-ANDERSON, Africa Ixmuca et al. *The SAR handbook: comprehensive methodologies for forest monitoring and biomass estimation*. 2019.
- [14] ENGLHART, S.; KEUCK, V.; SIEGERT, F. Aboveground biomass retrieval in tropical forests—The potential of combined X-and L-band SAR data use. *Remote sensing of environment*, v. 115, n. 5, p. 1260-1271, 2011.
- [15] JESUS, Janisson Batista de; KUPLICH, Tatiana Mora. Applications of SAR data to estimate forest biophysical variables in Brazil. *Cerne*, v. 26, p. 88-97, 2020.
- [16] KANKAKU, Yukihiko; SAGISAKA, Masakazu; SUZUKI, Shinichi. PALSAR-2 launch and early orbit status. In: *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2014. p. 3410-3412.
- [17] HUBER, Sigurd; YOUNIS Marwan; KRIEGER, Gerhard. *Tandem-L: SAR System Design Aspects*. 2017.
- [18] YAGÜE-MARTÍNEZ, Néstor et al. Interferometric processing of Sentinel-1 TOPS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 54, n. 4, p. 2220-2234, 2016.
- [19] PITZ, Wolfgang; MILLER, David. The terrasars-x satellite. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 48, n. 2, p. 615-622, 2010.
- [20] ULABY, Fawwaz Tayssir et al. *Microwave radar and radiometric remote sensing*. Ann Arbor, MI, USA: University of Michigan Press, 2014.
- [21] ØSTERGARD, A. et al. Sentinel-1 In-Orbit Calibration Approach. In: *Proceedings of the Living Planet Symposium*. 2013.
- [22] ZAKHAROV, Alexander; ZAKHAROVA, Liudmila. Palsar Calibration with Distributed Targets. In: *IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2019. p. 8328-8331.
- [23] SIVASANKAR, Thota et al. The potential of multi-frequency multipolarized ALOS-2/PALSAR-2 and Sentinel-1 SAR data for aboveground forest biomass estimation. *Int. J. Eng. Technol*, v. 10, p. 797-802, 2018.
- [24] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION "Characteristics of synthetic aperture radars operating in the Earth exploration-satellite service (active) around 9 600 MHz". [On-line], www.itu.int/dms_pubrec/itur/rec/rs/R-REC-RS.2043-0-201402-!!PDF-E.pdf, Geneva, 2014.
- [25] MARIANO, K. L. S.; DUMALAG, J. B. L. C.; CADIZ, N. R. R. ANALYSIS OF NOVASAR-1 S-BAND DATA IN DEVELOPING AN ALTERNATIVE LAND COVER MAPPING. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 48, p. 365-370, 2024.