

Sensoriamento remoto por radar a nível de pós-graduação no Brasil: desafios e soluções

Radar remote sensing at graduate level in Brazil: challenges and solutions

Polidori, Laurent



 Laurent Polidori
laurent.polidori@ufpa.br
Universidade Federal do Pará - UFPA, Brasil

Revista Presença Geográfica
Fundação Universidade Federal de Rondônia, Brasil
ISSN-e: 2446-6646
Periodicidade: Frecuencia continua
vol. 11, núm. 1, Esp., 2024
rpgeo@unir.br

Recepção: 14 Dezembro 2023
Aprovação: 26 Dezembro 2023

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/274/2744783002/>

Resumo: As propriedades físicas das micro-ondas e o princípio de aquisição de imagens de radar de abertura sintética não são nada intuitivos, por isso o sensoriamento remoto por radar não pode ser ensinado sem um mínimo de conhecimento matemático e físico. O desafio do ensino do sensoriamento remoto por radar é discutido, e o programa de treinamento criado pela UFPA com base na experiência anterior do autor é apresentado.

Palavras-chave: Radar de abertura sintética, ensino, Brasil.

Abstract: There is nothing intuitive about the physical properties of microwaves and the principle of synthetic aperture radar image acquisition, which is why radar remote sensing cannot be taught without a minimum of mathematical and physical knowledge. The challenge of teaching radar remote sensing is discussed, and the training programme set up by UFPA on the basis of the author's previous experience is presented.

Keywords: Synthetic aperture radar, education, Brazil.

INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto por radar é uma ferramenta valiosa para regiões com cobertura frequente de nuvens, devido ao fato de as micro-ondas serem muito pouco afetadas pelas condições atmosféricas. Já na década de 1970, vários programas de mapeamento foram lançados na Amazônia com levantamentos aéreos, tanto para

DECLARAÇÃO DE INTERESSES

Laurent Polidori possui graduação em engenharia cartográfica (1987), concluiu mestrado em física (1987), doutorado em geociências (1991) e habilitação a dirigir pesquisas (equivalente a "livre docência", 2001) pela universidade de Paris. Tem experiência em sensoriamento remoto e fotogrametria, com aplicações em geociências, ciências ambientais e fundiárias. Foi pesquisador na indústria espacial (Aérospatiale, Cannes, França, 1991-1999) e na pesquisa ambiental (IRD, Cayenne, Guiana francesa, 1999-2006). Foi professor titular no CNAM (Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, França, 2007-2015), onde foi diretor da ESGT (instituição de ensino e pesquisa em cartografia e agrimensura), e criou e dirigiu o GeF (laboratório de pesquisa em ciências cartográficas e fundiárias). Foi transferido ao CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) como pesquisador titular, diretor do CESBIO (Centro de estudos espaciais da biosfera, Toulouse, França, 2016-2020). Desde 2021 é professor titular no CNAM em licença sem vencimento, e professor visitante na UFPA (Belém). É autor ou coordenador de 7 livros e numerosas publicações na área de sensoriamento remoto e mapeamento da superfície terrestre. Foi presidente da SFPT (Sociedade francesa de fotogrametria e sensoriamento remoto) e representante da França na ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) de 2008 a 2014. Hoje é vice-presidente da SELPER-Brasil (associação dos especialistas brasileiros do sensoriamento remoto), e presidente da Comissão Científica "Remote Sensing" da ISPRS em nome da França e do Brasil (presidência binacional). Teve parcerias com várias instituições no Brasil: UFPA, UFPA, Museu Goeldi (Belém), IEPA (Macapá), UNESP (Presidente Prudente, Rio Claro), UNICAMP (Campinas), UFPE (Recife), UFPR (Curitiba), INPE (S. José dos Campos) etc. Foi coordenador da rede franco-brasileira ECOLAB sobre ecossistemas costeiros amazônicos (2004-2006). Desde 2020 mora em Belém (Brasil). Foi bolsista da FAPESPA como pesquisador visitante sênior (2021). Desde 2022 é vinculado à UFPA como professor visitante do PPGG (Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica), e professor colaborador na UFPA (PPGCA) e na UFPA.

cartografia oficial quanto para exploração de recursos naturais, como o RADAM no Brasil (Azevedo 1971; Van Roessel e Godoy 1974) e iniciativas semelhantes em alguns países vizinhos, com sensores de visada lateral que nem usavam ainda o algoritmo de abertura sintética para produzir imagens de alta resolução. Programas de mapeamento experimental também foram implementados com radares espaciais para avaliar o potencial de um novo satélite nas condições específicas da Amazônia. Por exemplo, o projeto Guyana Through the Clouds consistiu na elaboração de um mosaico de imagens do ERS-1 sobre toda a Guiana Francesa (Rudant 1994). Da mesma forma, o projeto SAREX-92 teve como objetivo avaliar o potencial dos dados de radar para ambientes de floresta tropical (Wooding et al. 1994), e o projeto GlobeSAR teve como objetivo testar os dados do satélite Radarsat sobre vários países da América Latina (Brown et al. 1996). Esses experimentos confirmaram o potencial das imagens de radar como fonte de informações para uma variedade de aplicações em geociências.

Os dados de radar têm sido frequentemente considerados como substitutos dos dados ópticos, o que é muito redutor, pois neste caso, seu potencial permanece subutilizado. Além disso, os princípios físicos e geométricos envolvidos na construção de imagens de radar são muito diferentes daqueles dos dados ópticos, o que torna a interpretação das imagens muito pouco intuitiva.

Por esse motivo, cursos de treinamento são oferecidos aos usuários há muito tempo. Mas eles sempre enfrentam a mesma dificuldade, ou seja, a interpretação de imagens de radar não é intuitiva e o treinamento é voltado para um público que nem sempre tem as noções básicas de eletromagnetismo e processamento de sinais necessárias para fazer um uso correto desses dados. Neste artigo, analisamos os desafios do treinamento de usuários de imagens de radar e uma solução proposta no Brasil.

O DESAFIO DO TREINAMENTO EM SENSORIAMENTO REMOTO POR RADAR

As imagens de radar podem geralmente ser utilizadas para destacar sem dificuldade as principais características de uma paisagem: o continente e o oceano separados pela linha costeira, os principais rios e estradas, as zonas urbanas, o território agrícola e alguns objetos artificiais (pontes, barcos etc.). A sensibilidade do radar a estas feições, que depende obviamente do comprimento de onda e da polarização, é muitas vezes suficiente para uma interpretação superficial, mas isto pode dar a impressão errônea de que os métodos tradicionais de foto-interpretação podem ser transpostos para as imagens de radar sem dificuldade e sem capacitação adicional.

No entanto, o comportamento das micro-ondas na superfície da Terra e o processo específico de construção da imagem usando o método de abertura sintética (SAR) não permitem que as chaves tradicionais de interpretação de fotografias aéreas sejam aplicadas. Por exemplo, em determinadas situações, podemos ver fenômenos estranhos (figura 1), como uma ponte representada por três linhas claras, um barco desalinhado com sua esteira, água sob uma floresta, um objeto pontual representado por uma grande cruz branca etc. O fenômeno do speckle, que é onipresente, mas variável, e o fato de as sombras serem totais também não são muito intuitivos.

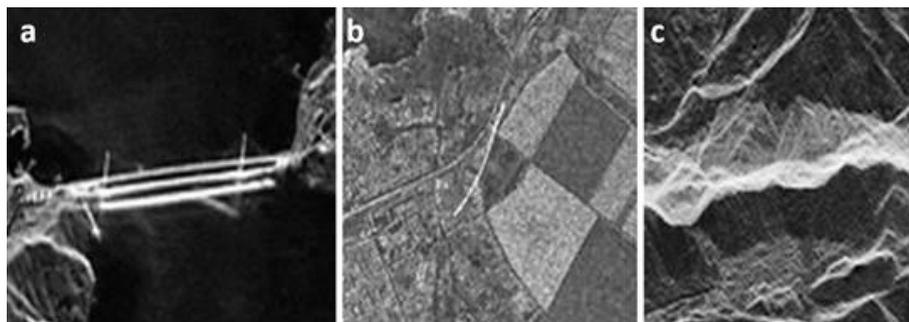


FIGURA 1

Alguns fenômenos contra-intuitivos encontrados nas imagens de radar : (a) uma ponte representada por 3 linhas claras, (2) um trem fora do trilho, (c) o fenômeno de layover

Fonte: JPL / DLR / ESA

Portanto, o treinamento do usuário deve ser baseado em uma apresentação rigorosa do processo de aquisição e construção de imagens SAR, o que requer conceitos matemáticos e físicos adequados. A maioria dos conceitos básicos é aprendida no segundo grau, como a derivação usada para derivar a frequência da fase do sinal, os logaritmos usados para expressar as quantidades medidas em decibéis, o produto escalar usado para definir a localização de um ponto na imagem ou os números complexos usados para expressar o eco cuja amplitude e fase foram medidas pelo radar. Mas esses conceitos raramente são aplicados posteriormente em geografia, geologia, ciências ambientais e disciplinas afins, e nem mesmo são suficientes para explicar tudo.

No que diz respeito à radiometria, embora as micro-ondas reajam com objetos comparáveis ao seu comprimento de onda e, portanto, de tamanho humano (folhas, galhos, telhas, ondas do mar etc.), os mecanismos de retroespalhamento de superfície ou volume não são muito intuitivos. A equação de radar costuma ser apresentada como o fundamento teórico da radiometria de radar. Ela é bastante fácil de demonstrar a partir das propriedades geométricas de uma onda esférica e do comportamento simplificado de uma antena, mas é adequada para alvos pontuais, principalmente considerados em aplicações militares, onde ela explica a possibilidade de detectar um objeto com o radar. Sua extrapolação para grandes superfícies (água, solo, floresta, plantações etc.) não é intuitiva, e a noção de coeficiente de retroespalhamento (equivalente da refletância ótica) é melhor compreendida por meio de exemplos do que de considerações teóricas.

A polarimetria pode ser entendida no caso de um alvo cujos elementos tenham uma orientação regular, como os caules verticais de uma plantação, uma superfície horizontal de água, um telhado inclinado etc., mas o comportamento polarimétrico do eco é muito menos intuitivo no caso da estrutura irregular do solo natural ou de um volume de folhagem.

No que diz respeito à geometria da imagem, o fato de os ecos serem localizados em função do tempo de propagação e, portanto, da distância, cria uma geometria que é localmente semelhante à de uma imagem ótica tirada do outro lado com um eixo de visualização perpendicular à linha de visada do radar (figura 2). Portanto, a imagem pode ser orientada com a iluminação de cima para baixo para proporcionar uma percepção confortável do relevo. Mas no caso de uma região montanhosa observada com um pequeno ângulo off-nadir, o fenômeno de foreshortening cria uma compressão de escala e uma saturação radiométrica das ladeiras voltadas para o radar e, pior ainda, o fenômeno de layover cria uma impressão de transparência e uma geometria inversa, ou seja, uma escala negativa, o que é totalmente contra-intuitivo.

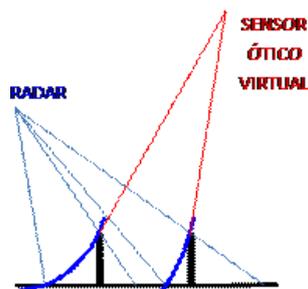


FIGURA 2

definição de uma geometria equivalente ótica

Fonte: autor (2023)

No que diz respeito à fase do sinal de radar, trata-se de um conceito puramente geométrico associado a distâncias da ordem de centímetros e, portanto, relativamente fácil de conceituar. No entanto, seu papel na construção da imagem de radar só pode ser explicado com base em cálculos com números complexos, o que é difícil de implementar em um curso de treinamento para usuários de imagens de radar para entender fenômenos como o speckle, a decorrelação interferométrica ou o deslocamento de um veículo em movimento, para realizar medições de deformações em um interferograma ou para explicar o algoritmo de abertura sintética e suas estranhas consequências, como o fato de que a resolução é independente da distância e que a localização é independente da orientação da plataforma.

Sem uma explicação rigorosa desses fenômenos, o aluno é obrigado a acreditar na palavra do professor e a aplicar critérios de interpretação que não entende.

O desafio desse tipo de treinamento é encontrar o justo equilíbrio entre os conceitos matemáticos e físicos indispensáveis e os exemplos reais que permitem que o aluno se familiarize com as imagens de radar por meio da prática, mas que permanecem limitados ao caso de um sensor e um terreno específicos. Há algumas décadas, quando havia poucos dados disponíveis, um acessório indispensável era o simulador, que permitia que o aluno variasse os parâmetros de aquisição (trajetória do sensor, ângulo de visada, comprimento de onda etc.) para observar seu impacto na imagem (Polidori e Armand 1995). Essa ferramenta é menos essencial hoje em dia, graças à disponibilidade de imagens de radar abundantes e facilmente acessíveis, mas a simulação continua sendo um recurso didático interessante.

GÊNESE E DESENVOLVIMENTO DE UM CURSO

Existem muitos cursos de capacitação sobre o princípio do radar, a física da antena e as técnicas de detecção, destinados a pessoas com uma base sólida em matemática aplicada, eletromagnetismo e processamento de sinais, cujas habilidades serão aplicadas ao desenvolvimento de sensores e sistemas de processamento. Um caso diferente é considerado aqui, o da comunidade de usuários de dados SAR, com habilidades em ciências da Terra e ambientais, que já usam o sensoriamento remoto ótico e para quem os dados de radar oferecem informações adicionais. Essa ampla comunidade também inclui geólogos e geofísicos que usam a interferometria de radar para medir a deformação da crosta como um complemento ao GNSS, aproveitando o radar como um instrumento de medição em vez de um gerador de imagens.

Venho desenvolvendo experiência no treinamento de usuários de imagens de radar desde a década de 1990, inicialmente na França e depois em vários outros países (Colômbia, Equador, Brasil, Cingapura, Marrocos), e em diversos contextos: disciplinas de currículos universitários, apoio à indústria espacial para promover novas missões espaciais e cursos sob medida para comunidades profissionais civis ou militares. A experiência desse ensino, que exigiu soluções pedagógicas adaptadas, levou à publicação de um livro (Polidori, 1997) que serviu de base para estudos na França e na África francófona por 10 anos. No Brasil, comecei em 1994 com um

treinamento para funcionários do ITA e do INPE, com um perfil de engenharia, seguido por vários cursos nos anos 2000 no norte do Brasil (Macapá, Belém, São Luis) com uma abordagem mais empírica para estudantes de ciências ambientais. Em 2013, criei um curso na UNESP (campus de Presidente Prudente) para alunos de pós-graduação em engenharia cartográfica. Trata-se de um perfil intermediário, com uma base sólida em ciências exatas e um bom conhecimento de questões ambientais e fundiárias. Tenho promovido esse curso em outras instituições brasileiras e fui convidado a oferecê-lo em várias universidades (UFPR, UFPE, UFRA). Nos últimos anos, um curso de sensoriamento remoto por radar foi criado na UFPA pelo PPGG. A partir de 2021, uma versão remota desse treinamento é oferecida na UFPA para alunos de pós-graduação do Brasil inteiro.

Este curso, oferecido nos modos presencial e remoto, destina-se sobretudo a estudantes de pós-graduação em geociências. Os principais objetivos são os seguintes:

- Saber interpretar uma imagem
- Reconhecer defeitos característicos em imagens de radar
- Saber escolher um sensor entre várias opções
- Saber escolher um modo de aquisição e um nível de processamento entre várias opções
- Compreender os metadados de um sistema de radar
- Compreender as noções de medição e de calibração
- Conhecer as aplicações possíveis e pô-las em prática

São feitas várias escolhas na abordagem pedagógica para garantir um justo equilíbrio entre teoria e prática :

(1) Várias características importantes das imagens de radar não dependem do processamento de SAR. O curso começa explicando o princípio clássico do SLAR (side-looking airborne radar), que é suficiente para explicar a geometria das imagens de radar e as distorções resultantes, a noção de coeficiente de retroespalhamento, a noção de speckle etc., o que evita iniciar o curso com a complexidade do algoritmo de abertura sintética. Esse algoritmo, que usa o efeito Doppler para localizar os ecos ao longo da trajetória do radar e produzir uma imagem de alta resolução, é explicado após o aprendizado dos conceitos básicos de geração de imagens de radar.

(2) As equações que explicam as características geométricas e radiométricas da imagem SAR podem ser difíceis de demonstrar se alguns alunos não tiverem as habilidades matemáticas para isso. Elas são demonstradas em casos simples e comentadas para destacar a influência dos vários parâmetros instrumentais. Por exemplo, a expressão da resolução em distância RES em terreno plano como uma função da largura de banda Df do impulso de radar e do ângulo de visada θ (equação 1) ajuda a explicar a impossibilidade de visualização vertical, que corresponde a $\theta = 0$. Além disso, ao introduzir a influência da declividade d (equação 2), podemos explicar o fenômeno de foreshortening que ocorre quando a onda de radar é perpendicular à ladeira de uma montanha (figura 3).

$$res = \frac{C}{2 \Delta f \sin \theta} \quad (1)$$

$$res = \frac{C}{2 \Delta f \sin(\theta - d)} \quad (2)$$

EQUAÇÃO (1) e (2)

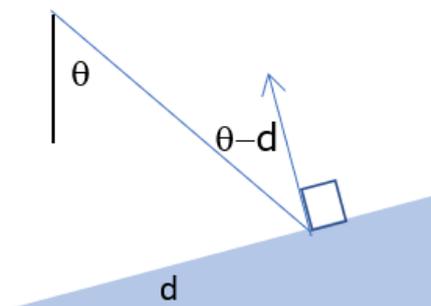


FIGURA 3
Efeito da declividade sobre a resolução (equação 2)
Fonte: autor (2023)

(3) O curso apresenta como funcionam todos os subsistemas envolvidos na aquisição de imagens, embora de forma simplificada (orbitografia de satélites, antena, instrumento de radar, processamento de SAR) e no pré-processamento (ferramentas de correção radiométrica e geométrica, filtros de speckle).

(4) São apresentados ilustrações e exemplos de aplicações em uma ampla gama de regiões, embora a maioria dos alunos planeje aplicar os dados de radar na sua região de estudo, no Brasil: por exemplo, em outros continentes e até mesmo em outros planetas, permitindo que os alunos apliquem os princípios do sensoriamento remoto por radar sem conhecimento prévio da região observada.

(5) Comparações são feitas regularmente com imagens ópticas, para não compartimentar as duas tecnologias, distinguindo claramente as características próprias do radar que o levam a produzir imagens diferentes: o fato de ser um sensor ativo, o fato de usar micro-ondas (comprimentos de onda entre dez mil e um milhão de vezes maiores do que os das imagens ópticas), o fato de ser coerente (ou seja, medir a fase) etc.

(6) Eliminar os efeitos da atmosfera (troposfera e ionosfera no caso de comprimentos de onda longos) é uma luta constante para o sensoriamento remoto. No caso do radar, a influência da atmosfera na amplitude e na fase é explicada de forma a dissipar a ideia simplista de que este sensor é insensível à atmosfera.

(7) O sensoriamento remoto por radar é uma tecnologia que remonta a mais de meio século. Embora os instrumentos sejam mais poderosos, mais leves, mais baratos etc., a qualidade das imagens (calibração, resolução etc.) melhorou principalmente em virtude dos algoritmos de cálculo, derivados do princípio da síntese de abertura. Muita atenção é dada a essa história, que nos ajuda a entender que o estado atual da tecnologia é apenas uma situação instantânea que evoluirá com o tempo. Conhecer a história de uma tecnologia sempre ajuda os alunos a se prepararem melhor para sua evolução.

Essa lista não é exaustiva nem absoluta, e a abordagem de ensino pode ser adaptada às perguntas e sugestões dos alunos, especialmente no caso de turmas pequenas (até 20 alunos), nas quais é possível uma maior interatividade.

No que diz respeito aos exercícios práticos, eles são necessários para entender melhor o potencial dos dados e o funcionamento das ferramentas de processamento em um contexto operacional. No entanto, a maneira tradicional de implementá-los, na qual o professor explicava aos alunos como um software funcionava e depois os observava trabalhar por uma semana, não é mais relevante atualmente. O software de processamento, que o centro de treinamento costumava comprar por um preço muito alto, agora é gratuito, e os alunos podem usá-lo em seu notebook ou no computador da família, desde que o curso não envolva processamento em grande escala. O exercício proposto no final do curso é primeiramente demonstrado pelo professor e, posteriormente, os alunos têm um período de algumas semanas, iniciado antes do final do curso teórico, para fazer o download das imagens, instalar uma ferramenta de processamento e aplicar um determinado número de operações às imagens (filtros de speckle, correções geométricas, classificações etc.).

Nos últimos anos, o trabalho prático tem consistido no processamento de imagens do satélite Sentinel-1 usando o software SNAP. O fato de os alunos trabalharem separadamente significa que cada um pode escolher sua própria área de estudo para enriquecer seu projeto de pesquisa pessoal com essa nova fonte de informações.

Um exercício adicional é proposto de forma opcional aos alunos com habilidades básicas de programação. O objetivo é desenvolver um simulador simplificado capaz de criar uma imagem de radar realista a partir de um modelo digital de terreno e um cenário de aquisição, com hipóteses simplificadoras, como uma terra plana ou uma trajetória linear. Dessa forma, os alunos podem reproduzir os fenômenos de speckle, foreshortening, layover etc. e visualizar o efeito de parâmetros instrumentais, como o ângulo de visada ou a resolução.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse treinamento pode ser oferecido de modo presencial ou remoto, de forma síncrona ou assíncrona, e pode ser adaptado a vários métodos de ensino à distância. Ele consolida o treinamento acadêmico em ciências da terra, mas também pode apoiar os esforços das agências espaciais para promover o uso de imagens de radar e preparar novas gerações de usuários com vista a novas missões espaciais. O aumento da comunidade de usuários de imagens de radar contribuirá para melhorar o mapeamento e o monitoramento ambiental em regiões tropicais, onde o sensoriamento remoto por radar é mais necessário do que em qualquer outro lugar.

AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer às instituições que lhe deram a oportunidade de colocar em prática suas propostas de ensino, em especial a UNESP (Presidente Prudente) e a UFRA (Belém), bem como a UFPA, que aceitou oferecer um curso completo a alunos de todo o Brasil.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, L. 1971. Radar in the Amazon. Proceedings of the 7th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Center for Remote Sensing Information and Analysis, *Ann Arbor*, p.2303-2306.
- BROWN, R.J.; BRISCO, B.; D'ITORIO, M.A.; PREVOST, C.; RYERSON, R.A.; SINGHROY, V. 1996. RADARSAT Applications: Review of GlobeSAR Program. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 22: 404-419.
- POLIDORI, L. 1997. Cartographie Radar, Gordon & Breach, Amsterdam, 303 p.
- POLIDORI, L.; ARMAND, P. 1995, On the use of SAR image simulation for the validation of relief mapping techniques. *EARSel Advances in Remote Sensing*, vol. 4, N° 2, p. 40-48.
- RUDANT, J.P. 1994. French Guyana through the clouds: first complete satellite coverage. *ESA Earth Observation Quarterly*, 44: 1-6.
- VAN ROESSEL, J.W.; GODOY, R.C. 1974. SLAR Mosaics for Project RADAM. *Photogrametric Engineering*, 40: 583-595.
- WOODING, M.G.; ZMUDA, A.D.; ATTEMA, E. 1994. An overview of SAREX-92 data acquisition and analysis of the tropical forest environment, In: Longdon, N. (Ed.). Proceedings of the Second Euro-Latin American Space Days, European Space Agency, Paris, ESA SP-363: 57-68.