

Mapeamento da cobertura hídrica da microrregião da Baixada Maranhense com dados do sensor SAR Sentinel 1A

Fabrcio Sousa da Silva ¹, Aduino Luís Moraes Pestana ²

¹Professor do Curso de Engenharia Ambiental – Faculdade Pitágoras e Analista Ambiental – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais do Maranhão, Brasil. (*Autor correspondente: fabriciosousasilv@gmail.com)

²Analista ambiental – Encarregado LABGEO Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais do Maranhão, Brasil

Histórico do Artigo: Submetido em: 16/12/2020 – Revisado em: 28/12/2020 – Aceito em: 11/01/2021

RESUMO

A identificação de localidades alagadas durante períodos de forte precipitação tem nos sensores radar uma importante ferramenta de teledeteção, dada a natureza de operação destes sistemas sensores. Este artigo estuda o potencial das imagens SAR Sentinel 1 para identificação da cobertura hídrica na microrregião da baixada maranhense, nos municípios de Penalva e Olinda Nova do Maranhão. Adquiriu-se uma cena do Sensor Sentinel 1A, na qual realizou-se procedimentos de correção geométrica, correção do efeito speckle, correção radiométrica, conversão para valores de retroespalhamento (decibéis- db) e limiarização (água, não-água), através da análise de histograma, apoiando-se em dados de campo e dados históricos da Diretoria de Serviço Geográfico. Com uma cena óptica do Sensor Sentinel 2B, obteve-se o índice de diferença normalizada da água (NDWI) para validação do limiar definido na cena S1A, através de uma correlação de dados rasters. Através da análise de histograma, verificou-se que os valores de db menores que -17 associam-se aos corpos hídricos da região, tendo em vista o comportamento característico deste alvo que retroespalha a grande totalidade do sinal emitido sobre ele pelo sistema sensor. Os resultados mostraram correlações forte positivas entre os valores obtidos pela técnica de limiarização (< -17 db) aplicada sobre o Sentinel 1A e o índice NDWI, a saber: Penalva com 0.905 e Olinda Nova com 0.866.

Palavras-Chaves: Sensoriamento Remoto, áreas úmidas, Índice de água por diferença normalizada, RADAR.

Mapping of the water coverage of the Baixada Maranhense micro-region (Brazil) with data from the SAR sensor Sentinel 1A

ABSTRACT

The identification of flooded locations during periods of strong recovery has radar sensors as an important remote sensing tool, given the nature of operation of these sensor systems. This article studies the potential of SAR Sentinel 1 images for identifying water coverage in the microregion of the Baixada Maranhão, in the municipalities of Penalva and Olinda Nova do Maranhão. A scene from the Sentinel Sensor1A was acquired, in which geometric correction, speckle effect correction, radiometric correction, conversion to backscatter values (decibels-db) and thresholding (water, non-water) were performed, through analysis histogram, relying on field data and historical data from the Geographic Service Directorate. With a Sentinel 2B sensor optical scene, the normalized water difference index (NDWI) was obtained to validate the limit defined in scene S1A, through a correlation of rasters data. Through the histogram analysis, it was found that the db values less than -17 are associated with the water bodies in the region, in view of the characteristic behavior of this target, which backscatters the great totality of the signal emitted on it by the system sensor. The results induced strong positive correlations between the values obtained by the thresholding technique (<-17 db) applied on Sentinel 1A and the NDWI index, the saber: Penalva with 0.905 and Olinda Nova with 0.866.

Keywords: Remote Sensing, wetlands, water index by normalized difference, RADAR.

Silva, F. S., Pestana, A. L. M. (2020). Mapeamento da cobertura hídrica da microrregião da Baixada Maranhense com dados do sensor SAR Sentinel 1A. Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto. v.1, n.2, p.58-71.



1. Introdução

O advento da tecnologia de sensoriamento remoto permitiu o avanço em diversas áreas do conhecimento, como por exemplo no que se refere ao monitoramento da dinâmica superficial terrestre, auxiliando estudos ambientais em diferentes escalas e possibilitando, de acordo com Florenzano (2002) uma visão abrangente e multitemporal de extensas áreas da superfície terrestre.

O sensoriamento remoto orbital pode ser dividido, quanto a fonte de radiação, em dois grandes grupos (Moreira 2012): Sensoriamento Remoto ótico (caracterizado por sensores passivos que dependem de uma fonte de radiação natural) e o Sensoriamento Remoto de Radar (*Radio Detection And Ranging* - detecção e posicionamento por meio de ondas de rádio) e/ou Sensoriamento Remoto de microondas (caracterizado por sensores ativos que emitem sua própria radiação). Enquanto as informações obtidas por sensores óticos são resultado direto das características físicas, químicas e biológicas dos alvos (Jensen 2009), as informações obtidas por sensores radar decorrem das características geométricas dos alvos tais como a rugosidade e propriedades dielétricas dos alvos, ângulo de incidência local, tipo de espalhamento reflexão de canto e polarização da onda eletromagnética (Jensen 2009; Lewis e Henderson 1998).

Uma característica ímpar desse método de imageamento é a aquisição de dados quase que independente das condições da atmosfera (Paradella et al. 2005), podendo ser aplicados em áreas em que a cobertura de nuvens é constante, como é o caso de regiões equatoriais, ou ainda adquirindo informações da superfície terrestre durante períodos de intensa precipitação. Nesse contexto, no Brasil, um dos trabalhos pioneiros desse segmento foi o projeto RADAM (Radar da Amazônia) iniciado na década de 70 (Sano et al. 2019).

Nos últimos anos são observados vários esforços no uso de imagens da faixa das microondas para mapeamento de alterações na cobertura da terra, com maior ênfase em eventos de supressão da cobertura vegetal, conforme aponta Guimarães (2017), onde percebe-se ainda um adensamento de estudos utilizando esta tecnologia na região norte do país (Furtado et al. 2016; Correia 2009; Nunes 2008; Nunes 2011; Servello 2010; Servello et al. 2010; Bispo et al. 2019; Lopes e Lima 2009; Narvaes 2010; Pinto 2015 et al.).

A aplicação da tecnologia de radar em recursos hídricos no Brasil tem sido observada em estudos relacionados a derramamento de óleo (Nascimento 2013), identificação de embarcações para fins de defesa (Gamba 2011), monitoramento das condições oceânicas (Oliveira 2016), e inundações em ambientes urbanos (Marinho et al. 2010), além de monitoramento de cheias em florestas de campinarana (Ferreira 2018) e mapeamento de ambientes úmidos (Teixeira e Souza Filho 2007; Teixeira 2011)

Sem dúvidas a aplicação da tecnologia de radar para mapeamento em ambientes úmidos, inseridos em zonas tropicais, mostra-se de grande relevância, uma vez que essas localidades apresentam importante papel no ciclo hidrológico, regulando a vida na terra e os processos do sistema terrestre.

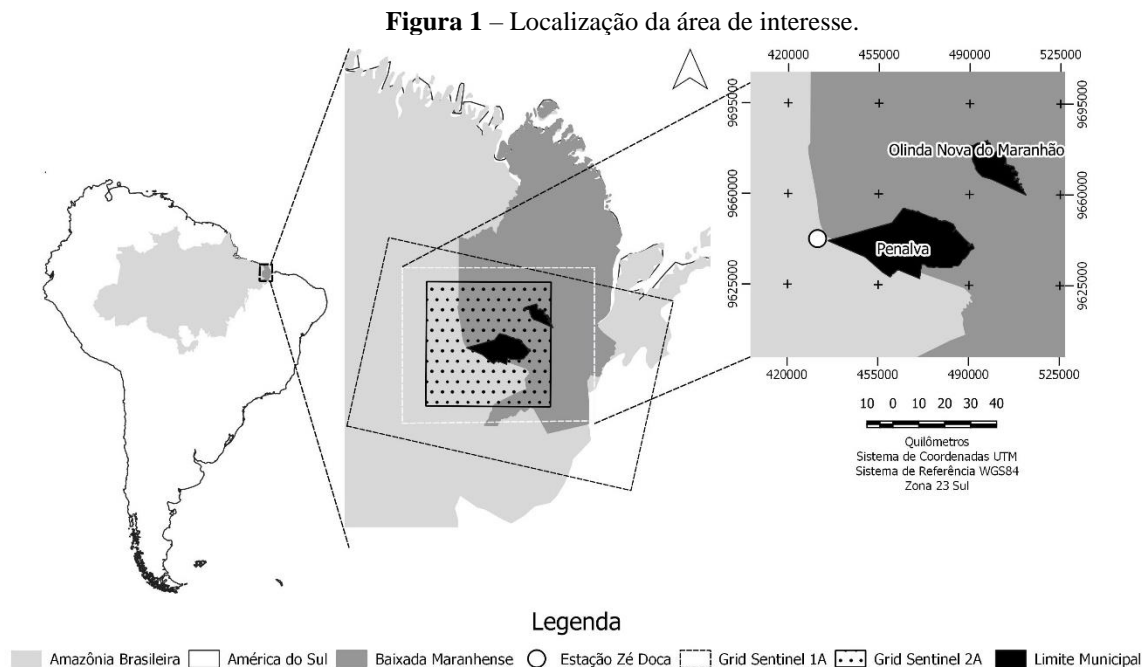
A microrregião da baixada maranhense é uma dessas áreas úmidas, composta ainda por extensos lagos perenes e temporários, inserida dentro do bioma amazônico e na região compreendida como amazônia maranhense. A legislação local define-a ainda como de relevante interesse ecológico (Maranhão 1989), com áreas sendo consideradas Sítio Ramsar, a partir do ano 2000. Nesta microrregião reside uma população de 334.650 habitantes, estimados em 2017 (IMESC 2018) e que, entre outras atividades, mantém relações econômicas com as águas deste local para fins de pesca e catação de mariscos, entre outras atividades (Almeida 2005, Chagas 2006).

Nesse sentido, o presente trabalho investigou a capacidade do Sentinel 1A, em identificar e diferenciar a cobertura hídrica, para o ano de 2019, de dois municípios desta microrregião, a saber: Penalva, e Olinda Nova do Maranhão.

2. Material e Métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

A pesquisa foi desenvolvida em dois dos municípios que integram a Microrregião da Baixada Maranhense (IMESC 2014), a saber: Penalva e Olinda Nova do Maranhão (figura 1).

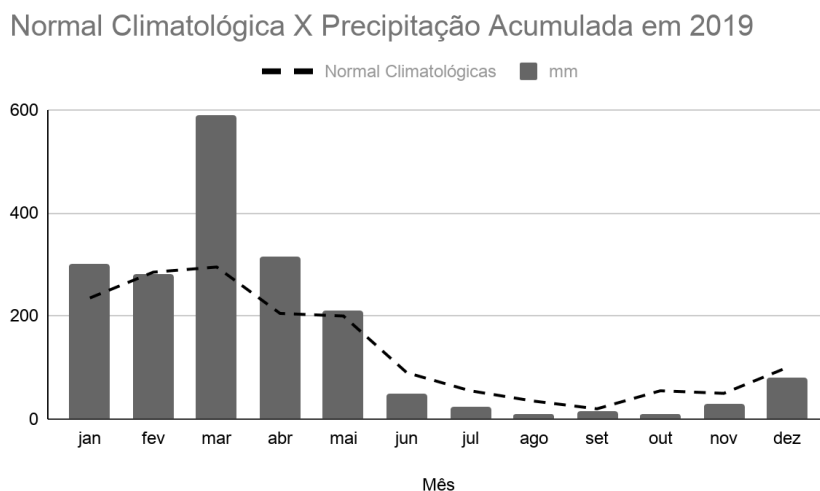


Fonte: Os autores, com dados do IBGE e INMET.

Feitosa (2006) caracteriza fisiograficamente a região como possuidora de um relevo rebaixado e plano a suavemente ondulado, variando altimetricamente, conforme Maranhão (2002), de 20 a 55 metros com áreas rebaixadas alagadas durante o período chuvoso originando extensos lagos interligados por um sistema de drenagem com canais interligados aos baixos cursos dos rios Mearim, Grajaú, Pindaré e Pericumã, além da influência da maré. O ecossistema da região pode ser dividido nas seguintes classes (Mochel e Castro, 2003) tendo em vista a sua dinâmica: campos inundáveis (áreas sujeitas à inundação sazonal, com lâmina d'água de aproximadamente 50 cm, durante fortes chuvas), campos pastejados ( reas sujeitas ao encharcamento e não submersão), campos salinos (também conhecido como apicuns), manguezais e as zonas úmidas costeiras.

O clima local é classificado como sendo do tipo Tropical Zona Equatorial Quente, cujas m dias mensais de temperatura são superiores a 18 c em todos os meses e apresenta condi es semi-úmidas entre 4 a 5 meses do ano. A média anual de umidade é superior a 80% e, a pluviosidade anual varia entre 1700 a 1900 mm (IBGE, 199; Embrapa, 2013). Historicamente, o primeiro semestre do ano é o período no qual se concentram as chuvas, de modo que os meses de fevereiro a abril registram os maiores acumulados, quando observada a estac o Z  Doca, localizada nas proximidades dos municípios investigados (figura 2)

Figura 2 – Normal Climatológica (1960-1990) e registro de precipitação acumulada em 2019 na Estação Zé Doca.



Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia -INMET (2019).

2.2 Aquisição de dados

Para a realização da presente pesquisa, realizou-se a aquisição de cenas orbitais da missão Sentinel, dos sensores S1A (Sintetic-Aperture Radar - SAR) e S2B (Óptico), com datas de passagem próximas ao período chuvoso, referente ao primeiro semestre do ano, para área de estudo, sendo o segundo mês de maior incidência pluviométrica, após o pico, conforme a Normal Climatológica (1960-1990). Ressalta-se ainda que a escolha dos locais de estudo decorreu destes estarem inseridos dentro da microrregião da baixada maranhense e não possuírem cobertura de nuvens na cena ótica, permitindo então este estudo. Os dados foram adquiridos gratuitamente no *Scihub* do Programa Copernicus, da Agência Espacial Europeia - ESA (<https://scihub.copernicus.eu>), e estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados dos Sensores SAR (S1A) e Ótico (S2B).

	S1A	S2B
Passagem	597/24	T23MN
Data	02/05/2019	03/05/2019
Hora(GMT)	8h41min	13h31min
Modo	Interferometric Wide	-----
Nível	Ground Round Detection	1C
Polarização	VH	-----
Faixa Espectral	Banda C(3.75cm)	3 (Valor central: 560 nm); 8 (Valor central: 562 nm)
Resolução Espacial	5x20m	10m

Fonte: ESA (2015).

Foram utilizadas, também, as Cartas Topográficas da Diretoria de Serviço Geográfico (DSG), na escala de 1:100.000, compreendendo a área de estudo (articulações MI-0547, MI-0608, MI-0609 e M-548), disponíveis no Banco de Dados Geográfico (<https://bdgex.eb.mil.br>).

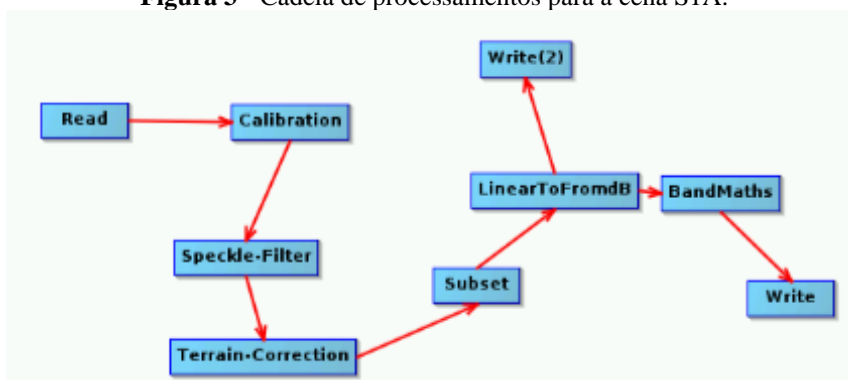
2.3 Procedimentos

2.3.1 Cena S1A

Para a imagem S1A, foram aplicados procedimentos de correção da cena em Amplitude, conforme Filipponi (2019), para a polarização VH, pois esta possui capacidade para maior separabilidade entre corpos hídricos e demais classes (Novo e Costa 2019; Ferreira 2018), em ambiente SNAP 7.0 (*Sentinel Application Platform* - Plataforma para aplicações Sentinel).

Os procedimentos foram: I) Calibração radiométrica para Sigma 0 (visando a obtenção dos coeficientes de retroespalhamento σ dB que caracteriza quanto da energia emitida em direção ao alvo retornou ao sensor) através do módulo Radar-Radiometric-Calibration; II) Redução Speckle (com o menu Single Speckle Filter usando as definições default do aplicativo, pois este processo além de remover a granulação mantém as informações das bordas dos alvos de interesse) e; III) Ortorretificação (com o apoio do módulo *Ellipsoid Correction* utilizando dados *Shuttle Radar Topography Mission* - SRTM de 30m já incorporado no aplicativo). Visando semi-automatizar os procedimentos, construiu-se um graph modeler na aplicação SNAP (figura 3).

Figura 3 - Cadeia de processamentos para a cena S1A.



2.3.2 Cena S2B

Segundo McFeeters (1996), os comprimentos de ondas das faixas do verde e infravermelho são capazes de captar o conteúdo de água presente nos elementos superficiais terrestres e, através da razão de bandas, é possível destacá-lo em relação a outros elementos da paisagem. Para a imagem Sentinel S2A, no QGIS 3.4, gerou-se o NDWI (Normalized Difference Water Index - Índice de água por diferença normalizada), conforme McFeeters (1996), através das bandas 3 (Verde) e 8 (Infravermelho), com o apoio da calculadora raster, conforme a equação 1.

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (1).$$

Onde:

Green: Faixa espectral do Verde;

NIR: Faixa espectral do infravermelho;

2.3.3 Identificação de áreas inundadas

Com o apoio das cartas DSG, identificaram-se localidades inundáveis, com base em dados históricos, para missão de coleta de dados. Foi realizada missão de campo para a área de interesse onde foram coletadas amostras referentes à cobertura hídrica local e, posteriormente, com estes dados, criou-se uma tabela representativa entre alvos e suas características na imagem SAR, analisou-se o histograma da cena S1A e limiarizou-se a cobertura hídrica através da tentativa e erro.

A limiarização, neste estudo, correspondeu a identificação de elementos associados à água e a elementos diferentes de água. Trata-se de um procedimento amplamente utilizada na literatura para investigações dessa natureza. Com o apoio da ferramenta *Calculate Raster - SAGA*, no Qgis, e identificados os valores de retroespalhamentos característicos de corpos hídricos, aplicou-se a limiarização para a cena S1A, de modo que, água recebeu o valor “1” e diferente de água recebeu o valor “0”. O mesmo procedimento utilizando o módulo SAGA fora aplicado para o NDWI, de modo que, para este, seguiu-se McFeeters (1996), considerando valores maiores que “0” como sendo associados a cobertura hídrica.

2.4 Validação

Os dados gerados de áreas inundadas (obtidos através da limiarização, item 2.3.2) da cena S1A e do NDWI da cena S2B, foram comparados através da ferramenta de *.correl* do módulo do GRASS, presente no QGIS. A ferramenta *.correl* permite a geração do índice de correlação de Pearson (Forte ou Fraco, Positivo ou Negativo) entre duas matrizes X e Y especificadas pelo usuário, avaliando pixel a pixel, os valores, conforme a equação 2.

$$Cor_{(x,y)} = \frac{Cov_{(x,y)}}{\sqrt{Var_{(x)}Var_{(y)}}}$$

$$Var_{(x)} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N} \quad (2)$$

$$Var_{(y)} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{N}$$

Por fim, analisaram-se os dados climáticos (precipitação) registrados na estação meteorológica do município de Zé Doca, por estar nas proximidades dos locais avaliados, buscando uma relação entre os dados obtidos a partir dos sensores orbitais.

3. Resultados e Discussões

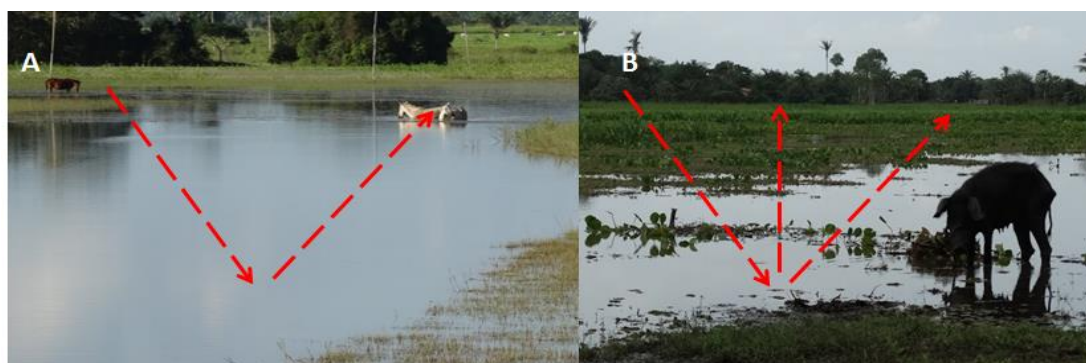
Foram verificadas localidades com características de campo inundado (incluindo localidades como lagos, rios, açudes para dessedentação e tanques de usos diversos) e localidades com características de campos encharcados (com lâmina de água inferior a 0,5 metros). Os dados representativos para a área de interesse estão na Tabela 2 na qual se verifica também a relação com a imagem SAR. Estes serviram de base para a etapa de limiarização por tentativa e erro.

Tabela 2 – Dados dos Sensores SAR (S1A) e Ótico (S2B).

	Foto	Descrição	Imagem Radar
Campo Inundado		Superfície inundada de lâmina > 0,5m com características lisas e tonalidade escurecida.	
Campo Encharcado		Superfície encharcada com solo lamoso < 0,5m com características de leve rugosidade e tonalidade cinza-esbranquiçada.	
Açude para dessedentação		Superfície variando de inundada de lâmina > 0,5m à encharcada < 0,5m. Tonalidades variáveis e forma geométrica indefinida.	
Tanque para fins diversos		Superfície inundada de lâmina > 0,5m com características lisas e tonalidade escurecida. destaque para forma geometricamente definida.	

Conforme a tabela 2, os alvos com características mais fortemente associadas à cobertura hídrica (com lâmina de água superior a 0,5m) apresentam-se com tons de cinza mais escurecidos em decorrência da geometria do alvo (caracteristicamente liso). Essa propriedade especular do alvo possibilita a perda de quase a totalidade da energia irradiada sobre o mesmo, ou seja, indicando um retroespalhamento sigma 0 baixo e consequentemente baixos valores também em Db (figura 4a). Em contrapartida, o retroespalhamento sigma 0, e consequentemente os valores em Db, apresentam-se um pouco maior nas localidades com lâmina de água menor que 0,5 metros, decorrente da interação da água com o solo (figura 4b), mais rugoso, que por sua vez confere características diferenciadas das superfícies mais lisas e calmas. Estas características da forma de dispersão da energia são discutidas em Bourgeau-Chavez et al. (2005).

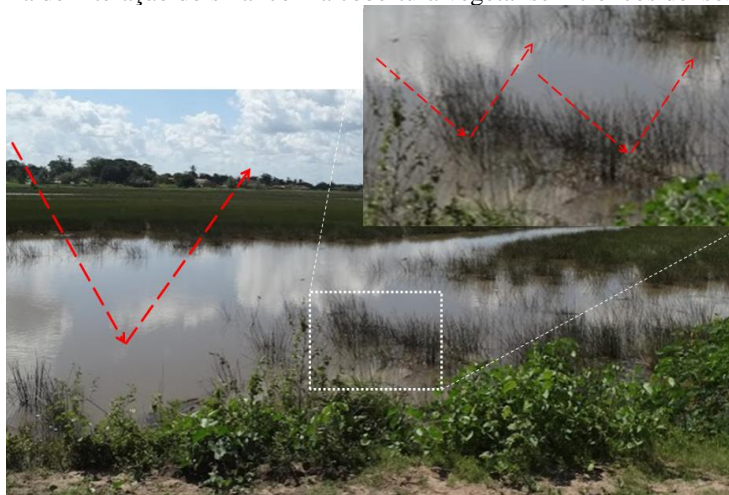
Figura 4 - Esquema de retroespalhamento de sinal, conforme Bourgeau-Chavez et al. (2005) adaptado para a região de estudo destacando: a) Retroespalhamento de região inundada com lâmina de água maior que 0,5 metros. b) Retroespalhamento de sinal de área encharcada com interação água-solo com lâmina de água menor que 0,5 metros.



Também é possível notar que a presença da água na superfície terrestre adiciona características diferenciadas a um determinado alvo, tratando-se da dielétrica. De modo que, à medida que este alvo é dotado de maior dielétrica, passa a retroespalhar mais sinal, retornando baixa intensidade ao sensor (Novo e Costa 2018; Ferreira 2018). Novo e Costa (2018) destacam ainda que sensores neste comprimento de onda (C), e nesta polarização (Cruzada VH), quando avaliados em ambientes úmidos apresentam grande separabilidade entre os demais alvos, sendo estes também observados na área investigada.

Em algumas localidades da área investigada, os campos inundados apresentam cobertura vegetal, onde destacam-se arbustos e plantas aquáticas (conhecidas popularmente na região como guarimãs) sem troncos densos, mas que conferem características de rugosidade ao local imageado. Nestas localidades, observa-se que a intensidade do comprimento de onda (4 a 7.5 cm), do sensor Sentinel 1A interage mais fortemente com a parte inundada do alvo, fator decorrente da intensidade do sinal, da própria estrutura geométrica do alvo, características dielétricas desse tipo de cobertura vegetal, ângulo de incidência (Novo e Costa, 2018) e da polarização escolhida. As polarizações cruzadas, tendem a interagir com galhos das coberturas vegetais, dos quais é possível obter respostas maiores de retorno (Ponzoni et al., 2012). Contudo, dada a configuração vegetal das áreas investigadas, e os parâmetros do sensor, não houve retorno de sinal significativo, fato pelo qual a interação do sistema sensor se deu de modo mais efetivo com a cobertura hídrica (figura 5).

Figura 5 - Retroespalhamento de sinal conforme Bourgeau-Chavez *et al.* (2005), adaptado para a região de estudo e destacando a forma de interação do sinal com a cobertura vegetal sem troncos densos nos campos alagados.



Após as análises de histogramas, dos dados compilados de campo e da tentativa e erro, verificou-se que o comportamento médio das amostras de água na cena SAR corresponde a uma faixa de retroespalhamento que variou entre -23 à -17 db (figura 6). Estes valores aproximam-se dos valores encontrados por Ferreira (2018) ao identificar localidades alagadas em Roraima, sendo que para estes foram considerados os valores de -25 á -17 como correspondentes à águas abertas e áreas inundadas. Para o NDWI, seguindo os postulados da literatura, foram considerados valores > 0 como sendo associados à cobertura hídrica. Para toda a cena manteve-se este valor (figura 7).

Figura 6 - Cobertura hídrica obtida através dos dados S1A.

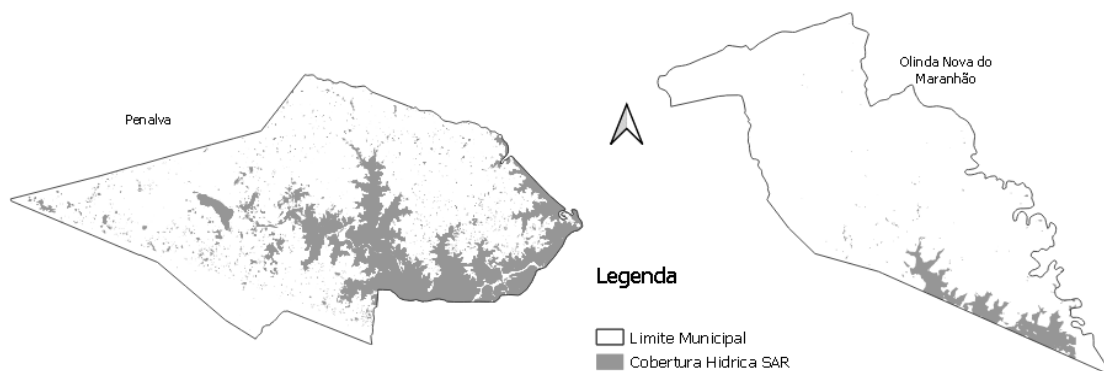
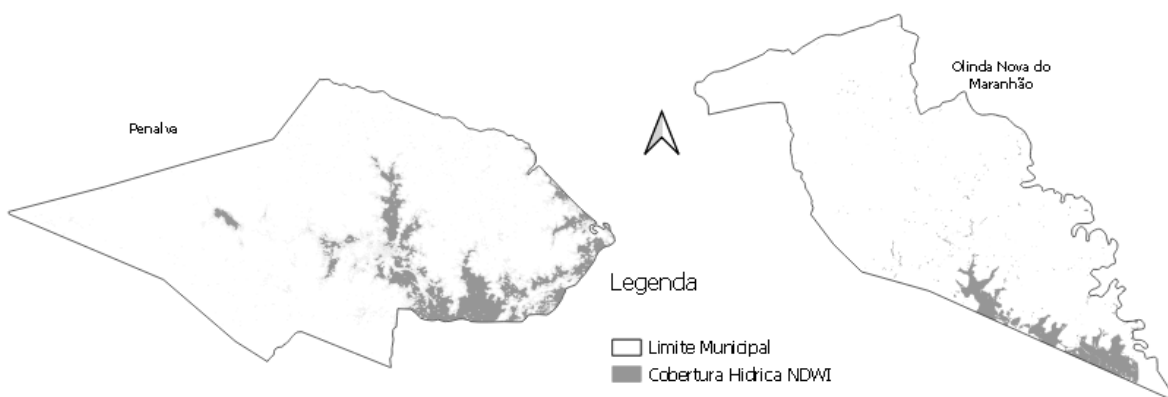


Figura 7 - Cobertura hídrica obtida através dos dados S2B.



Muito embora o total geral das áreas inundadas ou encharcadas apresente um quantitativo total muito próximo, ele não é capaz de aferir a correlação entre cada localidade de modo pontual das ocorrências, uma vez que o total pode ser igual, porém alocado em outra porção da superfície terrestre. Dessa feita, obteve-se o índice de correlação de Pearson referente a cobertura hídrica gerada pelos diferentes dados e métodos, conforme a equação 2 (tabela 3).

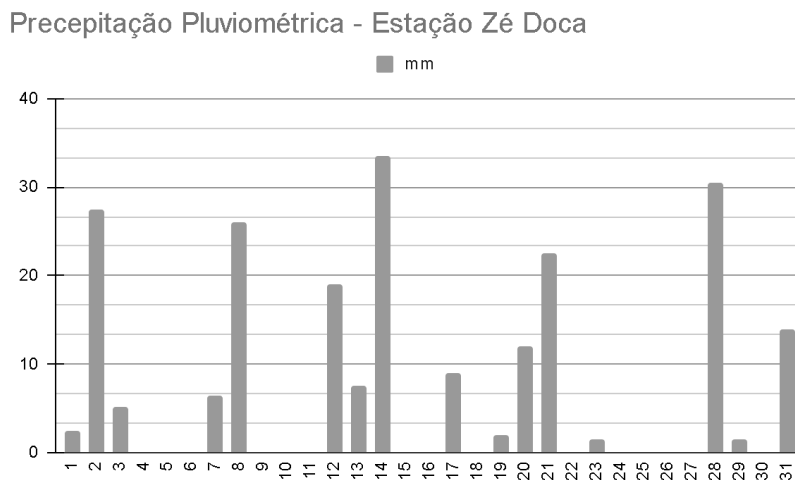
Tabela 3 – Comparativo entre as coberturas hídricas verificadas pelos diferentes sensores.

Município	Total (ha) NDWI	Total (ha) S1-SAR	Limiar NDWI	Limiar SAR (db)	Correlação de Pearson (r)	Classe
Olinda Nova do Maranhão	1.065,55	1.092,99	> 0	-23 à -17	0.866235	Forte Positivo
Penalva	11.590,6	12.069,8	> 0	-23 à -17	0.905075	Forte Positivo

Fonte: Os Autores.

É importante destacar ainda o comportamento da precipitação para a data dos eventos analisados, tendo como base a estação referencial (figura 1). Conforme observado na tabela 1, os dados orbitais apresentam diferenças de ordens diversas, além do lapso temporal entre as aquisições dos sensores utilizados na pesquisa.

Figura 8 – Registro de precipitação acumulada diariamente, durante maio de 2019, na estação de referência.



Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia -INMET (2019).

Para a estação analisada, observa-se precipitações pluviométricas acumuladas de ordem superior a 25 mm (Zé Doca) em 02/05/2019 (data de aquisição da cena S1A) e, menores índices de precipitação registrados no dia 03/05/2019 (data de aquisição da cena S2B), com valores de 5 mm. Desta feita, infere-se uma menor incidência pluviométrica na data que corresponde ao imageamento da cena S2B, e conseqüente cobertura hídrica NDWI. Ainda de acordo com os dados meteorológicos analisados, as temperaturas mantêm-se acima de 25°C, favorecendo o processo de evaporação das águas superficiais.

É oportuno enfatizar alguns aspectos da realidade local. A área de estudo possui poucas estações meteorológicas disponíveis, de modo que a estação de referencia localiza-se a 50 km da sede municipal de Penal e 74 km da sede municipal de Olinda Nova, sendo a mais representativa para dados de precipitação e inundação. Além disso, a região é possuidora de uma dinamica hidrica na qual, há a possibilidade de encharcamento da localidade (Mochel e Castro, 2003). Essas áreas, classificadas como campos pastejados, podem estar relacionadas ao fato da superestimação de área inundada, por parte do Sentinel 1A, uma vez que, solos encharcados (e não-submersos) tendem a possuir dielétrica diferenciada, por conta da presença de água. Este resultado é ainda de sobremodo importante, tendo em vista que tais áreas apresentam relevância ambiental, por possuírem indicadores de que podem ser sujeitas a inundação sazonal.

4. Conclusão

A avaliação da polarização VH em amplitude, oriunda de imageamento do sensor S1A, permitiu, através da análise do histograma dos valores retroespalhados pelos corpos hídricos e do limiar definido, a separabilidade destes ambientes úmidos de modo que estes valores são concordantes com a literatura especializada. O potencial do uso desta polarização também se mostrou satisfatório para o ambiente investigado.

Observou-se uma diferença na cobertura hídrica obtida ao se comparar os diferentes tipos de dados. Esta diferença apresentou relação com o lapso temporal entre as aquisições destes dados e as características ambientais locais, com destaque para o comportamento das chuvas na região.

Muito embora tenha havido uma diferença total entre a dimensão da cobertura hídrica obtida pelos dados do Sentinel 1 e do Sentinel 2B, a correlação obtida entre tais foi superior a 80%, permitindo assumir que, a limiarização da polarização VH de dados SAR para obtenção de espelhos de água, mostrou-se promissora também na área de interesse, assim como observada em outras localidades do Brasil.

Diante da dificuldade de obtenção de cenas óticas livre de incidência de nuvens, durante o período chuvoso e coincidentes com a passagem dos S1A e S1B, novos estudos devem ser conduzidos, utilizando outros sensores orbitais (CBERS 4 e 4A, Landsat OLI-8, MODIS e outros) e também dados de aerolevantamento apoiados com ARP (Aeronave remotamente pilotada), bem como a aferição de dados de campo coincidentes com as passagens do sensor SAR.

Tendo em vista que a Baixada Maranhense é composta por 21 municípios, e dada a importância dos ambientes úmidos na regulação da vida e o potencial de sensores de microondas em mapear tais áreas, novos testes devem ser realizados visando o mapeamento de toda a região de modo contínuo, durante os períodos de chuva e correlacionando com os totais precipitados nas estações de referência.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Governo do Estado do Maranhão, através da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Naturais – SEMA, pelo apoio na execução dos trabalhos de campo na Baixada Maranhense.

6. Referências

Almeida, I. C. S. (2005). **Indicadores e tensores ambientais nos aquáticos da região lacustre de Penalva, APA da Baixada Maranhense**. Monografia de Graduação, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, MA, Brasil.

Bispo, P. C., Pardinic, M., Papathanassiou, K., Kugler, F. (2019). **Mapping forest successional stages in the Brazilian Amazon using forest heights derived from tandem-x sar interferometry**. Remote Sensing of Environment, 232:111-194.

Bourgeau-Chavez, L. L., Smith, K. B., Brunzell, S. M., Kasischke, E. S., Romanowicz, E. A., Richardson, C. J. (2005). Remote sensing of regional inundation patterns and hydroperiod in the greater Everglades using synthetic aperture radar. **Wetlands** 25:176–191pp.

Chagas, J. O. (2006). **Análise da dinâmica de expansão dos sítios urbanos de Anajatuba – MA e Pinheiro – MA e seus impactos sócio-ambientais: perspectivas de um planejamento sustentável**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, MA, Brasil.

Correia, A. H. (2009). **Método automático para calibração polarimétrica de imagens SAR**. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.

DDC – Department of Design and Construction (2012). **BiM Guidelines**. New York City, July. Disponível em: http://facilities.usc.edu/uploads/documents/cas/BIMGuidelines_VS1_6_2012.pdf. Acesso em: 13/11/2016.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (2013). Relatório do diagnóstico do macrozoneamento ecológico-econômico do Estado do Maranhão.

EUROPEAN SPACE AGENCY - ESA. (2015). Sentinel-1: ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services. Disponível em <https://sentinel.esa.int/documents/247904/349449/S1_SP-1322_1.pdf>. Acesso em 10/Ago/2020.

Feitosa, A. C. (2006). Relevo do Estado do Maranhão: Uma Nova Proposta de Classificação Topomorfológica . **Anais do simpósio nacional de geomorfologia**, Goiânia, 11p.

Ferreira, G. H. S. (2019). **Identificação de áreas inundáveis na porção sul de Roraima com auxílio de imagens de Radar**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

Filipponi, F. (2019). Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. **Proceedings**, v.18, n.11, 4p.

Florenzano, T. G. (2002). **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos.

Furtado, L. F.A., Silva, T. S. F., Novo, E. M. L. M. (2016). Dual-season and full-polarimetric C band SAR assessment for vegetation mapping in the Amazon várzea wetlands. **Remote sensing of environment**, 174: 212–222.

Gamba, S. R. H., Sano, E. E. Rocha., M. P. R. (2011). Identificação de embarcações em imagens aerotransportadas de radar de abertura sintética (R-99 SAR) na área marítima do Brasil. **Boletim de ciências geodésicas**, 17: 458-475.

Guimarães, U. S. (2017). **Análise dos modelos digitais de superfície gerados por interferometria e radargrametria no estudo de ambientes costeiros amazônicos**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP, Brasil.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (1997). **Zoneamento geoambiental do estado do Maranhão**: Diretrizes gerais para a ordenação territorial. COSTA, RCC; MONTES, ML; SILVA, GB; FONSECA, EG; ORLANDI, RP; LIMA, EA; FONSECA, ALB. (Org). - Salvador, Bahia: IBGE. 44p.

IMESC - INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS E CARTOGRÁFICOS. **Enciclopédia dos municípios maranhenses**: Microrregião geográfica da Baixada Maranhense (2013). São Luís, IMESC. Disponível em: http://imesc.ma.gov.br/src/upload/publicacoes/ENC_MA_MICRORREGIAO_BAIXADA_MARANHENSE_2.pdf>. Acesso em: 15/Jul/2020.

_____. **Regiões de desenvolvimento do estado do Maranhão**: Proposta Avançada (2018). São Luís, IMESC, 2018. Disponível em: <https://seplan.ma.gov.br/files/2013/02/Proposta-IMESC_22-Regi%C3%B5es-de-Desenvolvimento-do-Estado-do-Maranh%C3%A3o-2018.pdf>. Acesso em: 01/ago/2020.

Jensen, J. R. (2009). **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres (2 ed). São José dos Campos: Parênteses.

Lewis, A. J., Henderson, P. M., Holcomb, D.W. (1998). Radar fundamentals: the geoscience perspective.in: Henderson, P.M.; Lewis, A. J. (ED.). **Manual of Remote Sensing: Principles & Applications of Imaging Radar. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, New York, 131-181pp.

Lopes, G. O., Lima, C. A. (2009). Características e aplicações das imagens SAR na identificação de alvos na Região Amazônica. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, Brasil, p. 7323-7330pp.

MARANHÃO. Constituição do estado do Maranhão: Promulgada em 5 de outubro de 1989.

_____. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Turismo do Maranhão. (2001). Diagnóstico dos principais problemas ambientais do Estado do Maranhão. São Luís, Litograph.

_____. Atlas do Estado do Maranhão. (2002). São Luís: Gerência de Planejamento e Desenvolvimento Econômico. Laboratório de Geoprocessamento.

Marinho, R. R., Paradella, W. R., Gavlack, A. A. (2010). Desastres naturais e imagens de radar: novas tecnologias a serviço de áreas afetadas - o caso de Gaspar, SC. **Anais do I Congresso Brasileiro de Organização do Espaço e X Seminário de Pós-graduação em Geografia da Unesp/Rio Claro**.

Mcfeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, 17: 1425–1432.

Mochel, F. R., Castro, A. C. L. (2003). Zoneamento Costeiro do Estado do Maranhão. Laboratório de Hidrobiologia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís.

Moreira, M. A. (2012). **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. 4ª Ed.** Viçosa, Ed. UFV.

Narvaes, I. S., Santos, J. A., Silva, A. Q. (2010). Analysis of structural parameters of forest typologies using L-band SAR data. **Boletim de Ciências Geodésicas**, 16,: 475-489.

Nascimento, T. C. M. (2013). **Mapeamento multi-temporal da sensibilidade ambiental a derrames de óleo em áreas inundadas na região dos rios Urucu e Arauã, Amazônia Central, utilizando imagens do satélite RADARSAT-1.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Novo, E. M. L. M., Costa, M. P. F. (2019). Fundamentos e Aplicações de Radar no Estudo de Áreas Alagáveis. In: Souza, RB (Ed.) **Oceanografia por Satélites**. São Paulo, Oficina de Textos.

Nunes, G. M., Souza Filho, C. R., Guimarães, F. L. (2011). Discriminação de fitofisionomias de floresta de várzea a partir do algoritmo Iterated Conditional Modes aplicado aos dados SAR/R99 (QUAD-POL/Banda L). **Revista acta amazonica**, 41: 471 - 480.

Nunes, G. M. 2008. **Sensoriamento remoto Aplicado à Análise da Cobertura Vegetal das Reservas de Desenvolvimento Sustentável Amana e Mamirauá.** Tese de Doutorado, Universidade de Campinas, Campinas, 163 p.

Oliveira, S. T. M. (2016). **Estimativa de vento utilizando imagens SAR do satélite Sentinel-1 da ESA**. Monografia de Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.

Paradella, W. R., Mura, J. C., Gama, F. F., Santos, A. R., Silva, G. G. (2015). Radares Imageadores (SAR) orbitais: tendências em sistemas e aplicações. **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, João Pessoa-PB. 2506-2513 pp.

Paradella, W. R., Santos, A. R. S., Veneziani, P., Cunha, E. S. P. (2005). Radares imageadores nas geociências: estado da arte e perspectivas. **Revista Brasileira de Cartografia**, 57: 56-62.

Pereira, L. E., Amorim, G., Grigio, A. M., Paranhos Filho, A. C. (2018). Análise Comparativa entre Métodos de Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) em Área Úmida Continental. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, 41:654-662.

Pinto, C. A., Paradella, W. R., Mura, J. C., Gama, F. F., Santos, A. R., Silva, G. G. (2017). Results of the application of persistent scatterers interferometry for surface displacements monitoring in the Azul open pit manganese mine (Carajás Province, Amazon region) using TerraSAR-X data. **Proceedings SPIE**, 47: 225-235.

Ponzonni, F. J., Shimabukuro, Y. E., Kuplich, T. M. (2012). **Sensoriamento Remoto da Vegetação** (2ª Ed).São Paulo, Oficina de Textos.

RAMSAR CONVENTION (2000). Disponível em: <<http://www.ramsar.org>>. Acesso em :08/Jul/2020.

Sano, E. E., Meneses, P. R., Almeida, T. (2019). Reflectância dos alvos na faixa de micro-ondas. In: Meneses, P. R., Almeida, T., Baptista, G. M. M. (ed.). **Reflectância dos materiais terrestres: análise e interpretação**.São Paulo, Oficina de Textos.

Servello, E. L., Kuplich, T. M., Shimabukuro, Y. E., Sano, E. E. (2010). Tropical Land Cover Change detection with polarimetric SAR data. **Proceedings: Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '10)**, Hawaii-United States of America. 1477-1480 pp.

Servello, E. L., Sano, E. E., Pantoja, N. V. (2015). Sentinel-1 SAR: efeito de filtros espaciais no estudo do uso do solo amazônico. **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, João Pessoa-PB, Brasil. 5173- 5179 pp.

Singhroy, V., Saint-jean, R. (1999). Effects of relief on the selection of RADARSAT-1 incidence angle for geological applications. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 3. 211-217pp

Teixeira, S. G. (2011). **Radar de Abertura Sintética Aplicado ao Mapeamento e Reconhecimento de Zonas Úmidas Costeiras**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.

Teixeira S. G., Souza Filho, P. W. (2007). Análise de coeficientes de retroespalhamento de imagens multitemporais RADARSAT-1 na discriminação de ambientes costeiros tropicais da região da Baixada Maranhense. **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, Brasil. 5019-5026 pp.