



Mercator - Revista de Geografia da UFC  
ISSN:  
ISSN: 1984-2201  
edantas@ufc.br  
Universidade Federal do Ceará  
Brasil

# ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DO SENTINEL-1 NAS ENCHENTES DA AMAZÔNIA CENTRAL

**Augusto Lopes Magalhães, Ivo**

ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DO SENTINEL-1 NAS ENCHENTES DA AMAZÔNIA CENTRAL

Mercator - Revista de Geografia da UFC, vol. 21, núm. 1, pp. 1-17, 2022

Universidade Federal do Ceará

Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=273674020017>

# ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DO SENTINEL-1 NAS ENCHENTES DA AMAZÔNIA CENTRAL

Ivo Augusto Lopes Magalhães  
ivosrmagalhaes@gmail.com



Acceso abierto diamante

## Abstract

Este estudo teve como objetivo analisar a dinâmica das áreas alagadas da série temporal Sentinel-1-SAR em um trecho da Amazônia Central entre 26 de setembro de 2016 e 8 de fevereiro de 2020. O total de imagens foi de 59 para cada polarização. Além disso, o estudo calculou a linha de inundação ordinária média (ALOF) a partir das alturas das réguas fluviométricas entre os anos de 1967 a 2020 e comparou-a com os valores presentes na série temporal do radar. O pré-processamento das séries temporais Sentinel-1 nas polarizações VV e VH utilizou a seguinte sequência metodológica: Apply Orbit File, Radiometric Calibration ( $\sigma_0$ ), Range-Doppler Terrain Correction, Speckle Filter e conversão para decibéis (dB). A análise prévia dos filtros adaptativos mostrou resultados diferentes para as duas polarizações, obtendo o melhor resultado para a polarização VV utilizando o filtro Frost com filtro 3x3 e a polarização VH com filtro Lee 3x3. A extração de corpos d'água e áreas úmidas utilizou um valor limite, confeccionando máscaras para todo o período. A extensão mais considerável da área inundável ocorreu em 17 de junho de 2019, com 6.611,86 km<sup>2</sup>, representando 16,42% da cena SAR na polarização VH e 6.443,19 km<sup>2</sup>, representando 16,10% da cena SAR na polarização VV. A relação entre as áreas úmidas de VH e VV com a altura da régua foi satisfatória, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) de 0,79 na polarização da HV e de 0,64 na polarização da VV e um valor de p menor que 0,05.

**Keywords:** Sensoriamento remoto, Radar, Mapeamento de Corpos D'Água.

## Resumo

O objetivo deste estudo é analisar a dinâmica das áreas cobertas pela série temporária Sentinel-1 SAR em um trecho da Amazônia Central no período de 26 de setembro de 2016 a 8 de fevereiro de 2020. O total de imagens foi de 59 para cada polarização. Além disso, a pesquisa calculou a linha de inundação ordinária média (LMEO) a partir das alturas das réguas fluviométricas entre os anos de 1967 a 2020 e a comparou com os valores presentes na série temporal do radar. O pré-processamento da série temporal Sentinel-1 nas polarizações VV e VH utilizou a seguinte sequência metodológica: correção de orbit, correção radiométrica ( $\sigma_0$ ), correção do terreno, filtragem do ruído, e conversão dos dados para decibéis (dB). A análise prévia dos filtros adaptativos mostrou resultados diferentes para as duas polarizações, obtendo o melhor resultado para a polarização VV usando o filtro Frost com 3x3 e para a polarização VH o filtro Lee 3x3. A extração de corpos d'água e áreas úmidas utilizou um valor limite fazendo máscaras para todo o período. A maior extensão da área de inundação foi medida em 17 de junho de 2019, com 6.611,86 km<sup>2</sup>, representando 16,42% da SAR na polarização VH e 6.443,19 km<sup>2</sup>, representando 16,10% da SAR na polarização VV. A relação entre as áreas de VH e VV em relação à altura da região foi satisfatória, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) de 0,79 na polarização da HV e de 0,64 na polarização da VV e p-valor menor que 0,05.

**Palavras-chave:** Sensoriamento Remoto, Radar, Mapeamento de Corpos Hidros.

## Resumen

Este estudio tuvo como objetivo analizar la dinámica de las áreas alagadas de la serie temporal SAR Sentinel-1 en un tramo de la Amazonía Central en el período de 26 de septiembre de 2016 a 8 de febrero de 2020. El número total de imágenes fue de 59 para cada polarización. Además, la investigación calculó la línea de inundación ordinaria media (AMEO) a partir de las alturas de las reglas fluviométricas entre los años de 1967 a 2020 y la comparó con los valores presentes en las series temporales del radar. El pre-procesamiento de las series temporales Sentinel-1 en las polarizaciones VV y VH utilizó la siguiente secuencia metodológica: corrección de órbita, calibración radiométrica ( $\sigma_0$ ), corrección del terreno, filtrado de ruido y conversión para decibelios (dB). El análisis previo de los filtros adaptativos mostró resultados diferentes para las dos polarizaciones, obteniendo el mejor resultado para la polarización VV utilizando el filtro Frost con 3x3 y para la polarización VH con el filtro Lee 3x3, confeccionando máscaras para todo el

período. A maior extensão da planície de inundação foi medida em 17 de junho de 2019, com 6.611,86 km<sup>2</sup>, representando 16,42% da cena SAR em polarização VH e 6.443,19 km<sup>2</sup>, representando 16,10% da cena SAR em polarização VV. A relação entre HV e VV em relação à altura da régua foi satisfatória, com coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) de 0,79 na polarização VH e 0,64 na polarização VV e p-valor menor que 0,05.

**Palabras clave:** Sensoriamento Remoto, Radar, Mapeamento de corpos d'água.

## INTRODUÇÃO

As extensões mais significativas de áreas inundáveis no Brasil estão nos biomas Pantanal e Amazônia. O rio Amazonas é responsável por aproximadamente 12% da área total da bacia amazônica, com uma grande variedade de fitofisionomias herbáceas, arbustivas e arbóreas, tanto terrestres quanto aquáticas (MELACK e HESS, 2010).

No território nacional, as áreas úmidas adjacentes aos rios federais são de propriedade da União. A Constituição Federal de 1988, em seu artigo 20, define que compete à União administrar as seguintes áreas: terras públicas não destinadas pelo Poder Público, lagos, rios e terrenos d'água em terras de seu domínio; Rios e lagos em áreas de fronteira com outros países; prados marinhos; ilhas oceânicas e costeiras; ou mar territorial; As Terras da Marinha; recurso mineral; sítios arqueológicos e pré-históricos; terras indígenas; entre outros (BRASIL, 1988).

O Decreto-Lei nº 9.760, de 5 de setembro de 1946, define Terras Marginalizadas como áreas delimitadas por águas de navegação, para um alcance das marés, com quinze metros medidos horizontalmente no sentido do terreno contado a partir da Linha de Fronteira Ordinária (ALOF). A definição de Terras Marginais considera a compreensão da dinâmica dos pulsos de cheia dos rios federais.

O cálculo do ALOF utiliza dados de séries históricas de estatísticas fluviométricas considerando a média anual máxima do nível completo por cabelo menos 20 anos. Outro dado crítico é o marco geodésico mais próximo do trecho de demarcação para realizar o nivelamento topográfico com transposição da elevação altimétrica entre o marco geodésico e a altura relativa da estação fluviométrica, obtendo assim a cota topográfica da ALOF (SPU, 2001).

Os rios extensos e as áreas desabitadas do bioma amazônico são mais caros para obter informações in loco devido à demanda por planejamento, equipamentos, transporte e recursos humanos. Assim, técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento são alternativas viáveis para obtenção e coleta de informações sobre corpos d'água.

Imagens ópticas de satélite na região amazônica têm cobertura limitada devido à intensa interferência com a cobertura de nuvens por um longo tempo (FORQUOR et al., 2014). Portanto, os sistemas de radar são os mais indicados para monitorar essa região passando por nuvens e nebulosidade. Um sistema SAR usa processamento de sinal sofisticado para sintetizar uma antena mais extensa do que seu tamanho físico real. O satélite Sentinel-1 SAR pertencente à missão da Agência Espacial Europeia (ESA) foi lançado em 2014, com um sensor de micro-ondas operando na banda C em polarizações simples (HH ou VV) ou duplas (HH/HV ou VV/VH). Modos de alta resolução espacial e temporal.

Entretanto, o principal fator de interferência associado à interpretação da imagem RADAR é a presença de ruído speckle (TELLO, LOPEZ-MARTINEZ e MALLORQUI, 2006; CHANG et al., 2007; SANTOSO et al., 2016). O ruído speckle gera uma aparência granular na imagem, composta por molaças bruscas no nível de cinza em pixels espacialmente cerca (FURTADO et al., 2016). Portanto, esse ruído degrada a qualidade das imagens, interferindo em todas as etapas de detecção de alvos escuros, exigindo o uso de processamento em múltiplas visualizações (multi-look) ou a aplicação de filtros para sua suavização (DONG, MILNE e FORSTER, 2001 e FURTADO et al., 2016).

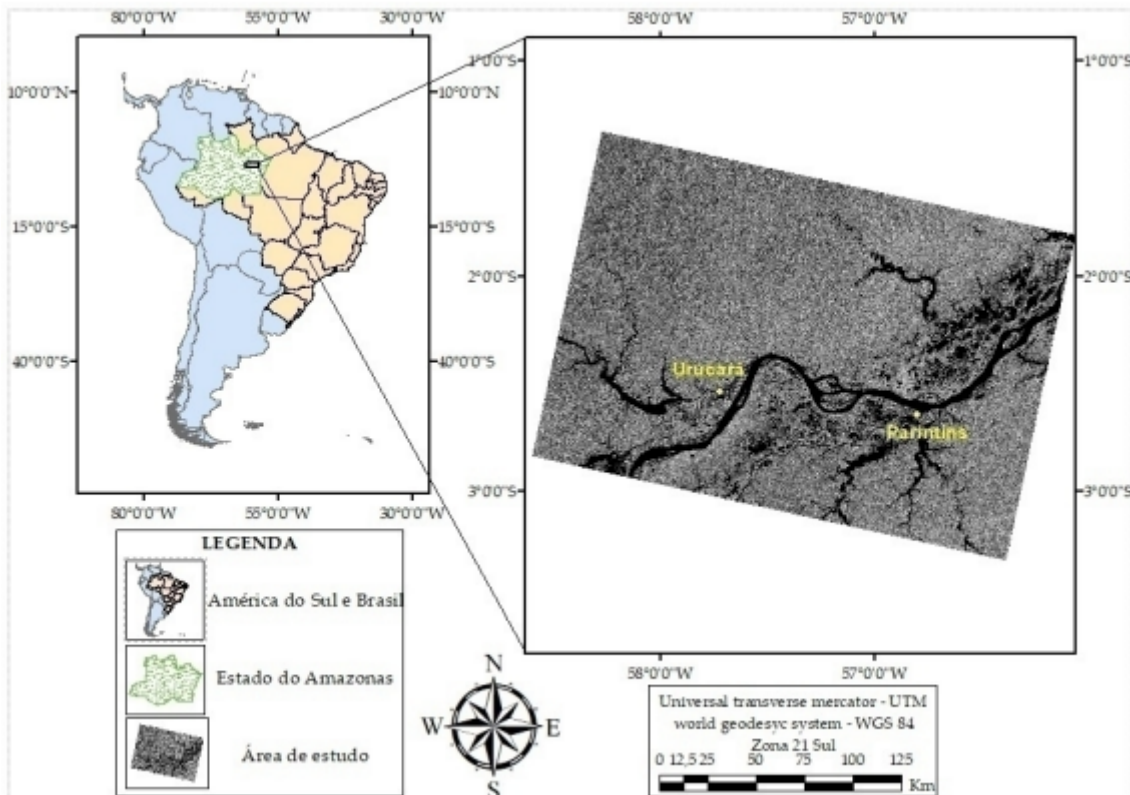
O objetivo desta pesquisa é medir as áreas de inundação e o ALOF por meio de dados fluviométricos (1967-2020) e séries temporárias de imagens Sentinel 1-SAR (2016-2020) em polarização VH e VV em um trecho altamente inundado da Amazônia.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada entre os municípios de Urucará e Parintins, leste de Manaus, no estado do Amazonas, compreendendo o rio Amazonas no quadrante com as coordenadas geográficas 2° 32' 11" S

57° 45' 38" W e 2° 37' 42" S 56° 44' 11" W (Figura 1). O clima é "Am" na classificação de Köppen, com precipitação pluviométrica anual de 1.355 a 2.839 mm. O período completo teve início em maio e término em julho, seguido de um período seco entre setembro e novembro (RAMALHO et al., 2009).

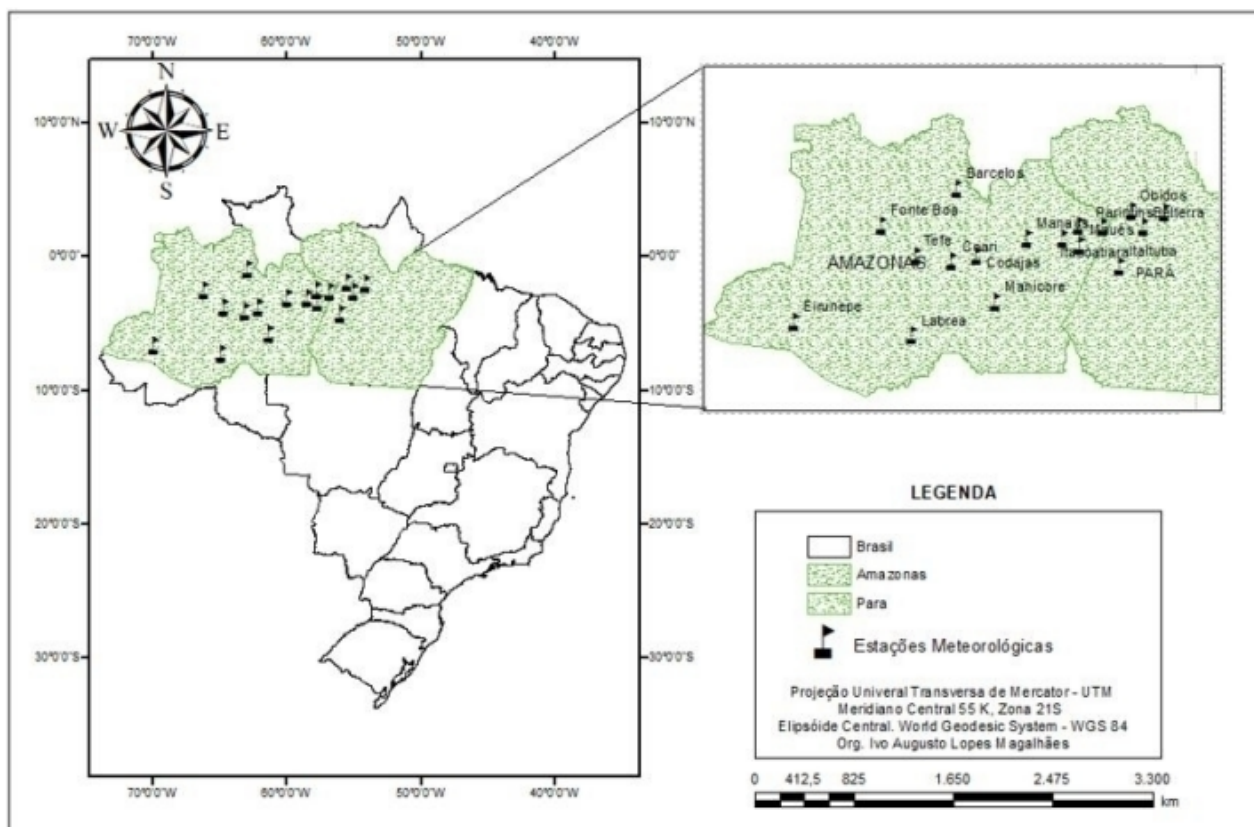


#fig1en.jpg

Figura 1 - Localização geográfica da área de estudo na Amazônia Central.

## IMAGENS SENTINEL-1 E PRÉ-PROCESSAMENTO

As imagens do Sentinel-1 (SAR) estão disponíveis gratuitamente no site da Agência Espacial Europeia (ESA) (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>), com diferentes características (Tabela 1). Este estudo adquiriu 59 imagens do satélite Sentinel-1 em polarização VH e VV na região da Amazônia Central no período anual entre 26 de setembro de 2016 e 8 de fevereiro de 2020. As imagens correspondem ao modo Interferometric Wide Swath (IWS), descendo com alcance de solo nível 1 detectado (GRD). O pré-processamento utilizou o software Sentinel Application Platform (SNAP) versão 7.0.0, considerando a seguinte sequência metodológica: Apy Orbit File, Radiometric Calibrate ( $\sigma_0$ ), Geometric Correction (Range-Doppler Terrain Correction), Speckle Filter e conversão dos dados de linear para decibéis (dB).



#tab1en.jpg

Tabela 1 - Parâmetros dos modos de aquisição da missão Sentinel-1. Fonte: SEC (2017).

Fonte: SEC (2017).

Os softwares utilizados nas fases de geoprocessamento e validação dos dados foram Envi 5.5 e ArcGIS 10.6. A extração temporal dos corpos d'água e áreas inundáveis usou a técnica de mascaramento no cubo temporal das imagens SAR a partir da definição de um valor limiar usando o programa Envi 5.5. Posteriormente, convertimos as máscaras em vetores para medir as áreas alagadas e definir o ALOF para a região em estudo.

## FILTRAGEM DE DADOS

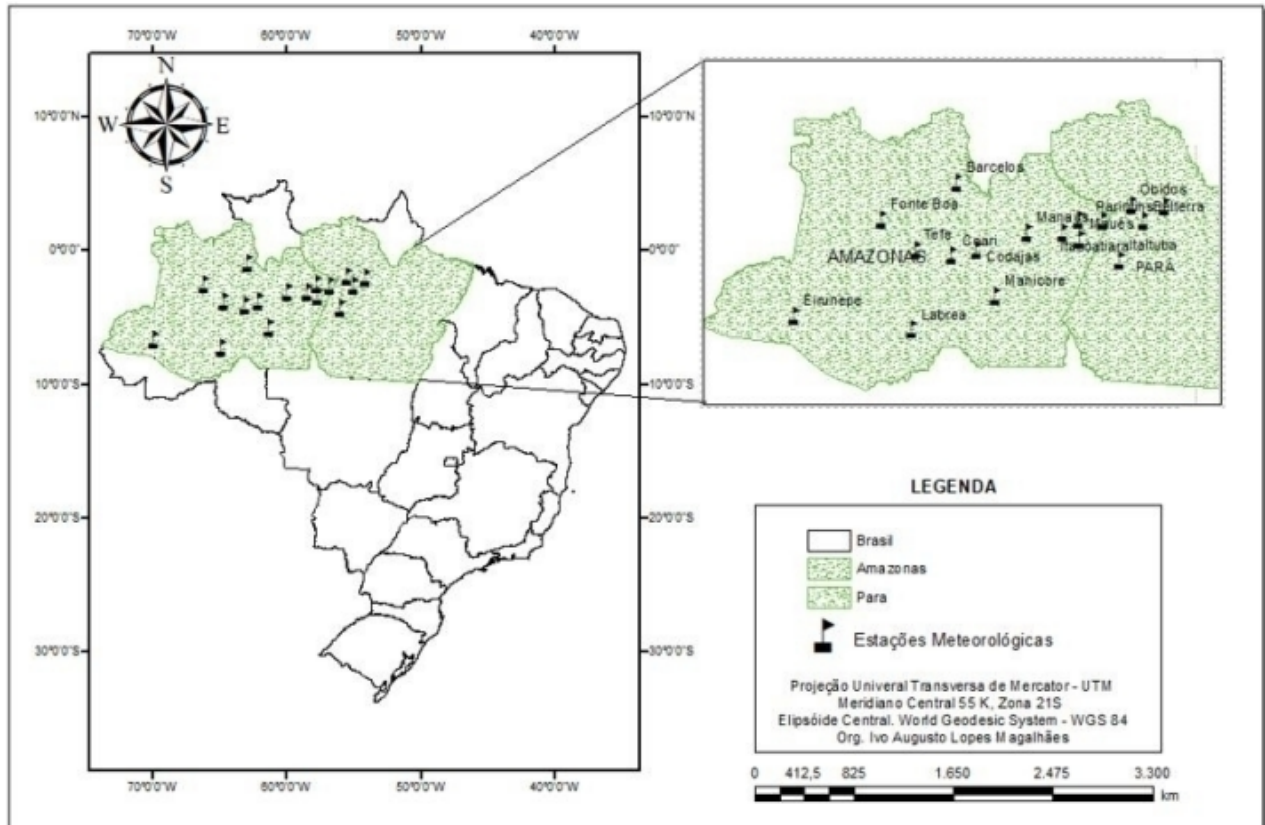
Speck noise causado por interferência aditiva ou destrutiva com sinais de retorno de radar para cada célula prejudica a interpretação visual das imagens (Lee e Pottier, 2009). A seleção do melhor filtro para cada polarização considerou sete métodos de filtragem (Frost; Mapa Gama; Lee Aprimorado; Ler; IDAM 1, 2 e 3; mediana; e Boxcar) em três dimensões de janela (3x3, 7x7 e 11x11). A análise usou 40 amostras distribuídas uniformemente ao longo da imagem de referência com tamanho de 5.000 km<sup>2</sup>. As métricas analisadas foram: Erro Quadrático Médio (EPM), Erro Médio Absoluto (EAM), Relação Ruído Sinal-Ruído (SNR), Razão Ruído Sinal-Pico (PSNR), Índice de Reservas de Borda (IPE), Distorção de Contraste (DCON) e Número Equivalente de Olhares (NEL).

## ELABORAÇÃO DO CUBO TEMPORAL

A montagem do cubo temporal considerou as 59 imagens SAR nas polarizações VH e VV de 26/09/2016 a 08/02/2020. O cubo temporal apresenta as coordenadas geográficas do "x (linhas)" e "y (colunas)" e a trajetória temporal do "z" com a sequência dos dias em ordem crescente (CARVALHO JUNIOR et al., 2008). Portanto, o atributo z do cubo temporal descreve a presença de áreas inundáveis nas duas polarizações, VH e VV.

## CAMPOS DE VENTO

A velocidade do vento influencia os valores do retrospalhamento SAR no Rio Amazonas, Lago Grande e Lago Moratinga nas polarizações VH e VV. Os dados de velocidade do vento (metros por segundo) utilizaram provêm do Banco de Dados Meteorológicos do Sistema de Irrigação e Pesquisa (BDMEP) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Tabela 2). A pesquisa utilizou 14 estações pluviométricas localizadas na Amazônia Central e três estações pluviométricas localizadas no estado do Pará para eliminar o efeito de popa no procedimento de interpolação (GARDIMAN JUNIOR et al., 2012). A interpolação da velocidade do vento utilizou as médias das 17 estações, incluindo os mesmos dias das imagens SAR entre 01/09/2016 e 08/02/2020 (Figura 2). (2012), a técnica de interpolação spline regularizada mantém o mesmo valor de dados de amostra na estação local,



#fig2en.jpg

Figura 2 - Mapa das estações meteorológicas utilizadas para interpolação de campos eólicos na Amazônia Central, estado do Pará.

Estação	Município e Estado	Latitude	Longitude	Velocidade média do vento (mps)
82240	Parintins, AM	-2,630	-56,730	1,03
A1222	Maués, AM	-3,399	-57,673	1,14
82317	Tefê, AM	-3,830	-64,700	0,52
82425	Coari, AM	-4,080	-63,130	1,15
82331	Manaus, AM	-3,110	-59,950	0,91
82336	Itacoatiara, AM	-3,130	-58,430	1,13
82113	Barcelos, AM	-0,960	-62,910	0,99
82326	Cadajás, AM	-3,830	-62,080	1,93
82533	Manicoré, AM	-5,8100	-61,300	0,68
82445	Itaituba, PA	-4,2800	-56,000	0,94
82178	Obidos, AM	-1,910	-55,510	1,66
82246	Belterra, PA	-2,630	-54,950	0,94
82181	Monte Alegre, PA	-2,000	-54,080	2,99
82723	Labrea, AM	-7,2500	-64,830	1,9
82212	Fonte Boa, AM	-2,530	-66,160	1,1
82610	Eirunepe, AM	-6,660	-69,860	0,04
A124	Urucará, AM	-2,534	-57,758	1,12

#tab2en.jpg

Tabela 2 - Nomenclatura das estações meteorológicas e dados de velocidade do vento. Fonte: INMET, (2020).  
Fonte: INMET, (2020).

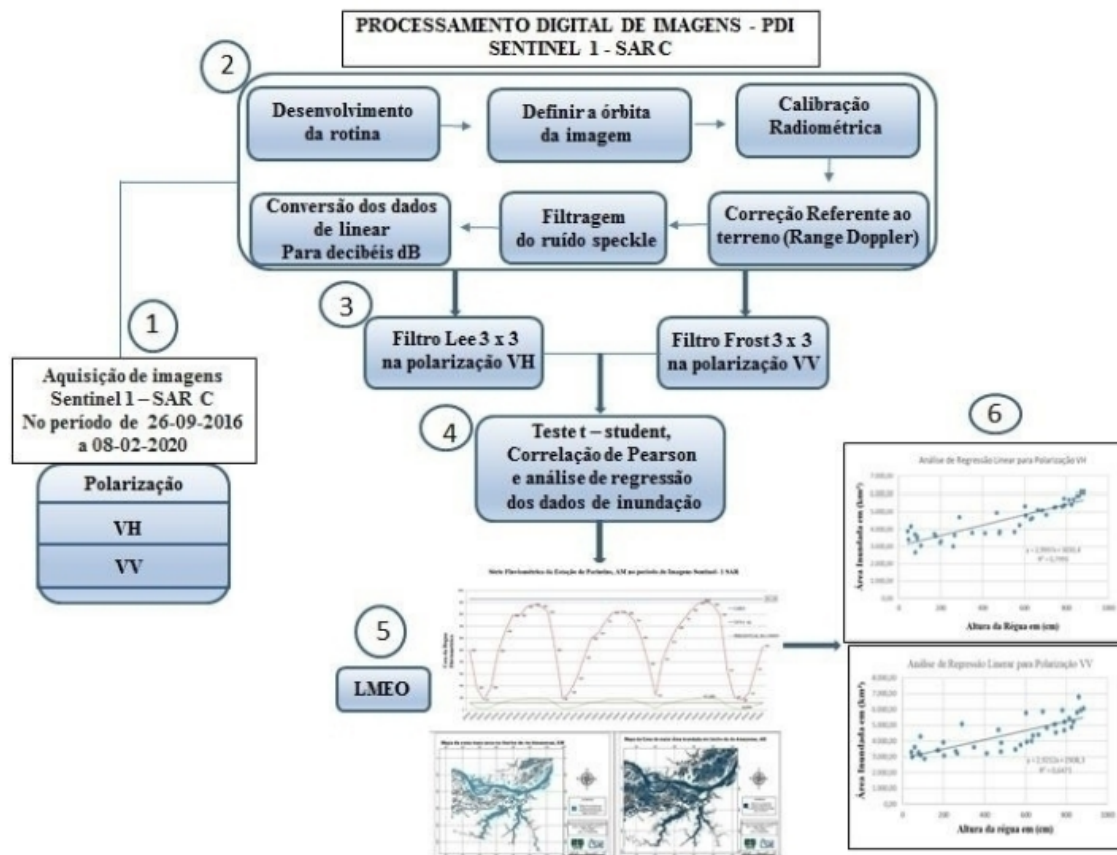
## CÁLCULO DA LINHA MEDIANA DE CHEIAS COMUNS - ALOF

O cálculo do ALOF utiliza os dados fluviométricos da série histórica (1967-2020) do Rio Amazonas no município de Parintins, obtidos por meio do site hidroweb (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>) da Agência Nacional de Agência de Águas (ANA). Os procedimentos técnicos seguirão a Orientação Normativa para a Demarcação de Terras Marginalizadas (SPU, 2001). A estimativa do ALOF utiliza uma série histórica de 65 anos, referente ao código da estação ANA 16350002 e considerando um período mínimo de retorno de 3 anos e máximo de 20 anos. Calculando-se a média da soma das maiores leituras mensais da régua fluvial, obtendo-se um ALOF em centímetros baseado na régua local para o rio Amazonas na região de Parintins, AM. Esses dados devem ser calculados posteriormente para obter sua altitude topográfica.

## ANÁLISE ESTATÍSTICA DE SÉRIES TEMPORAIS

A análise de regressão linear e correlação de Pearson compara os seguintes dados: valores medidos entre as polarizações VH e VV, a relação entre a área de inundação obtida pela série SAR temporária com os níveis do regime fluviométrico e a precipitação acumulada para cada mês em Parintins, Estação

Meteorológica AM. Essa análise permite estimar uma função entre a área inundada e os dados medidos em campo. O fluxograma metodológico sintetiza as etapas desenvolvidas neste estudo (Figura 3).



#fig3en.jpg

Figura 3 - Fluxograma metodológico das etapas realizadas na análise do trecho central do rio Amazonas.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### ANÁLISE DE TÉCNICAS DE REDUÇÃO DE RUÍDO DE IMAGEM

#### Amazona

A mancha de ruído é generalizada durante todo o jantar da SAR, com alta interferência nas corporações de água. A análise visual das imagens SAR demonstra que a filtragem espacial minimiza significativamente a fração de ruído, aumentando a clareza do rio Amazonas, corpos d'água e vegetação nas polarizações. As tabelas 3 e 4 listam os valores estatísticos das diferentes técnicas de filtragem para imagens SAR nas polarizações VH e VV. Os melhores resultados foram diferentes entre as duas polarizações. Na polarização VH, o filtro Lee 3x3 apresenta os melhores resultados na redução de ruído com os menores EPM (1,88) e MAE (1,638), assim como os maiores PSNR (13,35) e SNR (10,27). A maioria dos filtros apresenta resultados aproximados, mas o filtro Frost 3x3 apresenta a discrepância mais significativa entre as técnicas de filtração em polarização VH com alto EPM (8,95), MAE (6,28) e distorção de contraste. Na polarização VV, o filtro Frost com 3x3 obteve o melhor desempenho com valores baixos para MSE (1,2), MAE (628) e janela de distorção de contraste.

Filtros VH	MSE	MAE	SNR	PSNR	CoC	DCON	NEL
Frost 3x3	8,95	1,634	4,1377	12,68	0,4702	1,7266	4,641
Frost 7x7	2,88	1,638	8,6336	13,17	0,6994	1,7224	13,443
Frost 11x11	2,68	1,637	8,9233	13,2	0,7222	1,7231	21,345
G M 3x3	3,89	1,641	6,804	13,04	0,6011	<b>1,719</b>	12,664
G M 7x7	2,60	1,636	9,184	13,21	0,7361	1,724	22,513
G M 11x11	3,40	1,636	8,033	13,1	0,6303	1,724	<b>23,899</b>
Lee	3,91	1,638	7,6331	13,04	0,644	1,721	7,782
Enhanced							
<b>Lee 3x3</b>	<b>1,88</b>	<b>1,633</b>	<b>10,277</b>	<b>13,35</b>	<b>0,824</b>	1,722	8,454
Lee 7x7	2,490	1,636	9,6613	13,23	0,751	1,724	15,130
Lee 11x11	2,713	1,635	9,2503	13,19	0,725	1,725	20,795
IDAM 1	2,73	1,638	8,294	13,19	0,714	1,722	16,784
IDAM 2	2,915	1,640	8,030	13,16	0,696	1,720	18,564
IDAM 3	3,551	1,640	7,1902	13,08	0,614	1,720	17,560
Mediana 3x3	3,46	1,637	8,2216	13,09	0,662	1,723	11,829
Mediana 7x7	3,64	1,637	7,7089	13,07	0,6112	1,723	15,084
Mediana 11x11	3,43	1,6394	7,4250	13,09	0,6212	1,72138	22,818
Boxcar 3x3	3,48	1,638	8,0076	13,09	0,6602	1,72218	1,4121
Boxcar 7x7	2,22	1,637	8,5251	12,28	0,6747	1,72378	1,9142
Boxcar 11x11	2,17	1,636	8,4309	12,29	0,669	1,7242	2,9944

#tab3en.jpg

Tabela 3 - Valores dos índice métricos para as técnicas de filtragem na polarização VH.  
Tabela 3 - Valores dos índice métricos para as técnicas de filtragem na polarização VH.

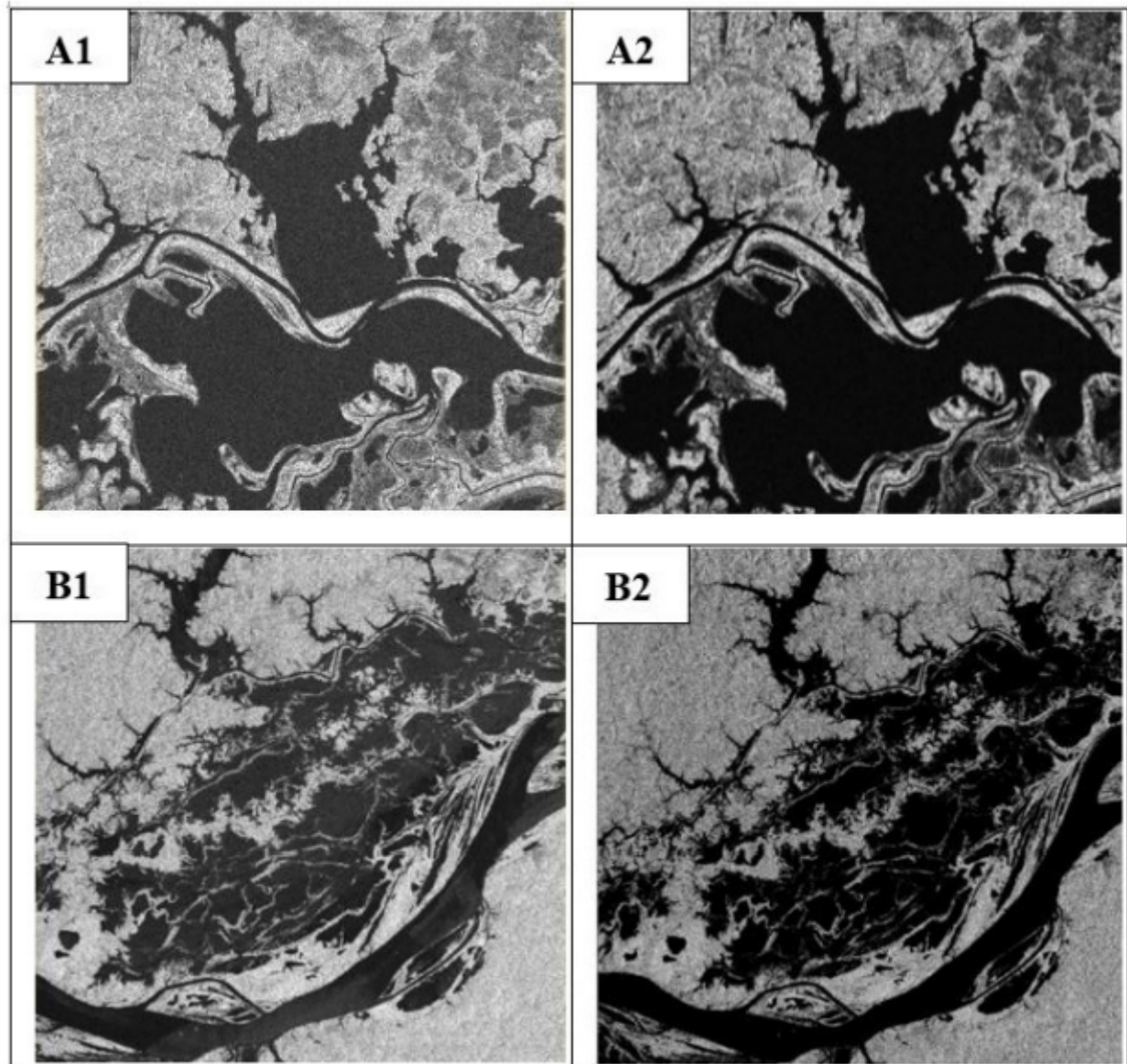
Filtros VV	MSE	MAE	SNR	PSNR	CoC	DCON	NEL
<b>Frost 3x3</b>	<b>1,2</b>	<b>6,26</b>	<b>13,54</b>	<b>12,51</b>	<b>0,91</b>	6,59	12,09
Frost 7x7	3,4	6,28	8,97	12,09	0,75	6,59	17,67
Frost 11x11	4,5	6,27	8,11	11,97	0,64	6,59	21,78
G M 3x3	2,1	6,28	11,58	12,29	0,85	6,59	11,65
G M 7x7	3,9	6,27	8,92	12,03	0,7	6,6	18,38
G M 11x11	4,4	6,27	8,06	11,98	0,65	6,59	23,48
Lee Enhanced	4,1	6,29	7,86	12,01	0,7	<b>6,58</b>	14,02
Lee 3x3	3,7	6,27	9,44	12,06	0,74	6,6	11,559
Lee 7x7	4,9	6,27	7,78	11,93	0,61	6,59	18,17
Lee 11x11	5	6,27	7,73	11,92	0,6	6,6	21,23
IDAM 1	3,5	6,28	8,7	12,08	0,75	6,59	19,74
IDAM 2	4	6,28	8,33	12,02	0,7	6,59	20,13
IDAM 3	6,4	6,29	5,77	11,82	0,5	<b>6,58</b>	15,45
Mediana 3x3	2,5	6,29	3,76	11,22	0,22	<b>6,58</b>	10,49
Mediana 7x7	4,7	6,28	7,43	11,95	0,63	6,59	19,81
Mediana 11x11	5	6,28	6,99	11,92	0,6	<b>6,58</b>	25,58
Boxcar 3x3	3	6,28	8,34	11,15	0,68	6,59	18,74
Boxcar 7x7	2,9	6,27	7,14	11,16	0,55	6,59	24,62
Boxcar 11x11	2,9	6,27	7,55	11,15	0,57	6,6	<b>39,78</b>

#tab4en.jpg

Tabela 4 - Valores dos índices métricos para as técnicas de filtragem na polarização VV.

Tabela 4 - Valores dos índices métricos para as técnicas de filtragem na polarização VV.

Portanto, a filtragem espacial através de dois filtros Lee 3x3 na polarização VH e Frost 3x3 na polarização VV minimizou significativamente a fratura por ruído (Figura 4).

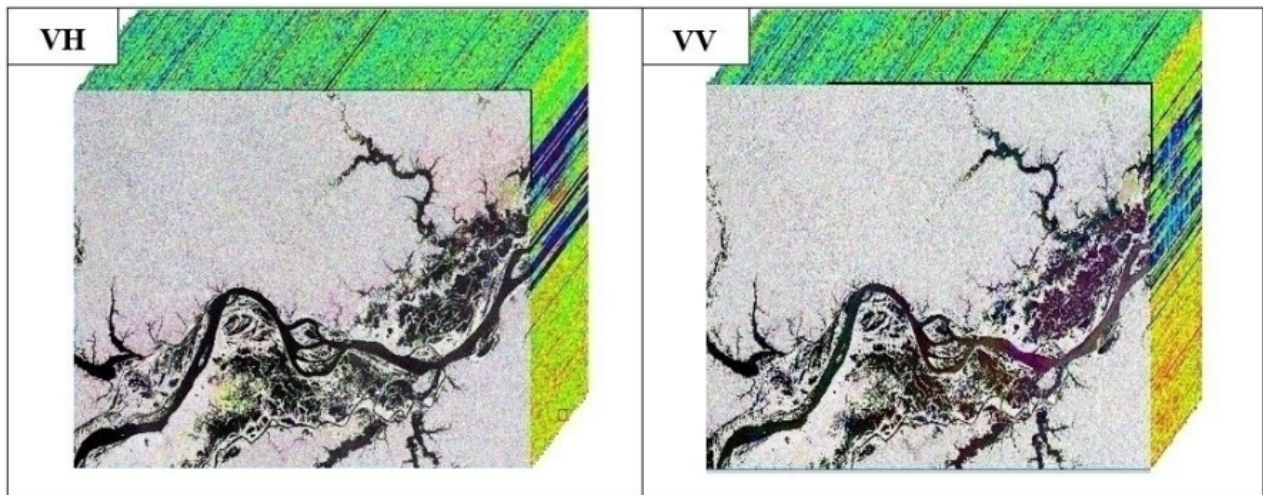


#fig4en.jpg

Figura 4 – Imagem sentinel-1 de corpos d'água em polarização VH (A1) filtrados por Lee 3x3 (A2), e em polarização VV (B1) e filtrados por Frost 3x3.

## ANÁLISE DE CUBO TEMPORAL

O cubo temporal permite a análise da dinâmica sazonal das áreas alagadas, com maior volume de corpos d'água em maio, junho e julho e menor volume em novembro, dezembro e janeiro. A Figura 5 demonstra que as polarizações VV e VH não apresentam diferença visual significativa para os corpos d'água.



#fig5en.jpg

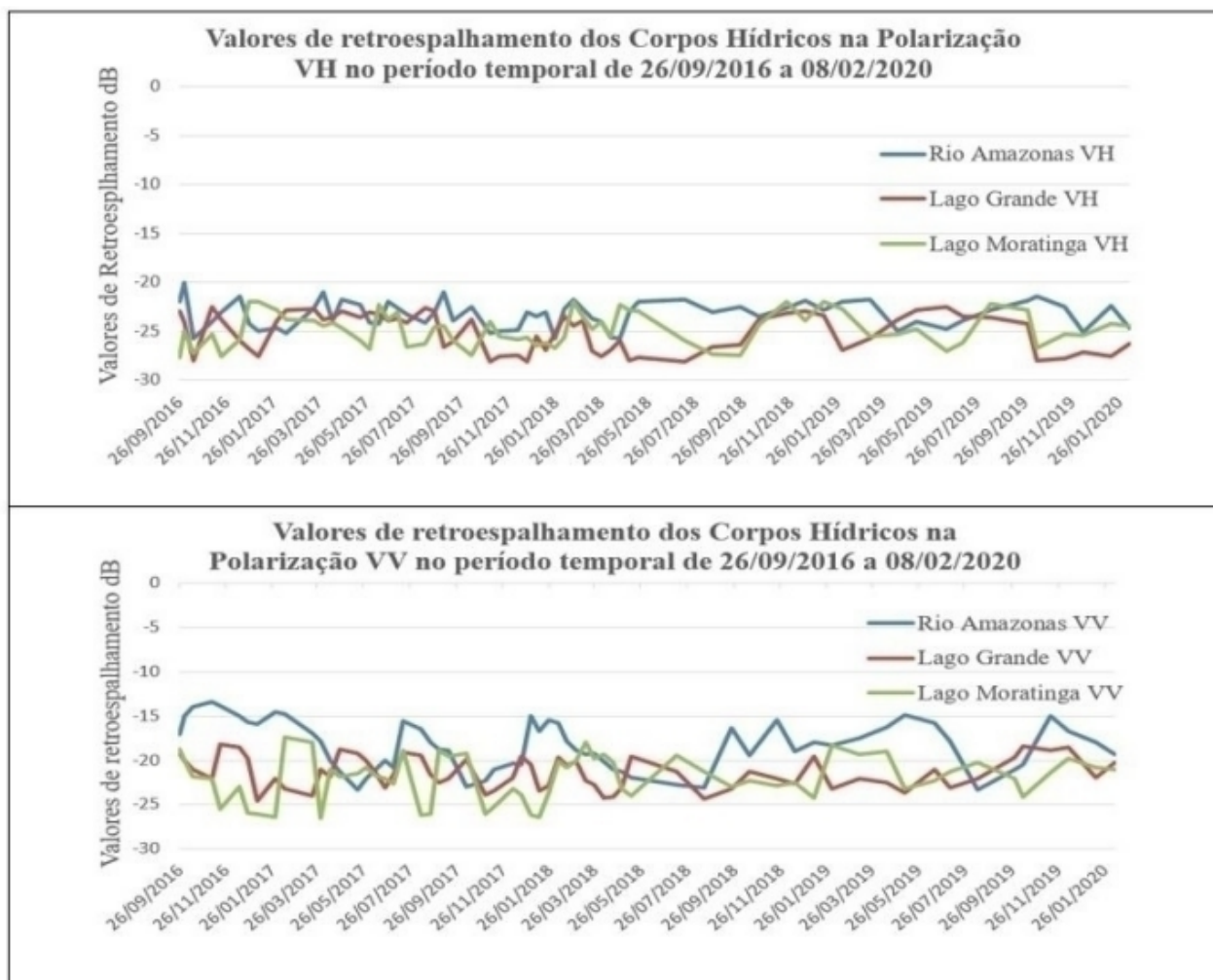
Figura 5 - Cubo de composto temporário por 59 imagens Sentinel-1 nas polarizações VH e VV entre 26/09/2016 e 08/02/2020.

No entanto, a incapacidade da banda C de penetrar no dossel das árvores (aproximadamente 5 cm) dificulta a mensuração da confiança em áreas úmidas sobre a cobertura florestal. Marques et al. (2017) análise de áreas úmidas utilizando um cubo temporal de imagens PALSAR/ALOS-2 na Ilha do Bananal, seção média do rio Araguaia no estado do Tocantins. Esses autores concluem que a variação da área de inundação foi de 10% entre as imagens com os menores e maiores níveis de inundação.

Ferreira (2018) utilizou um cubo temporal de 29 imagens Sentinel-1 com o método de aprendizado de máquina Random Forest e o valor limite em imagens SAR para identificar áreas úmidas no sul de Roraima ao longo de 2017. Os resultados demonstram o comportamento típico de áreas às margens de rios e feições adjacentes ao Rio Branco. Em julho, o pico do rio mais de 72.000 ha na área de estudo, e o pico do pico seco em dezembro mais de 37.000 ha.

### CHARACTERIZAÇÃO DA RETRODISPULSÃO SAR DE CORPOS DE ÁGUA

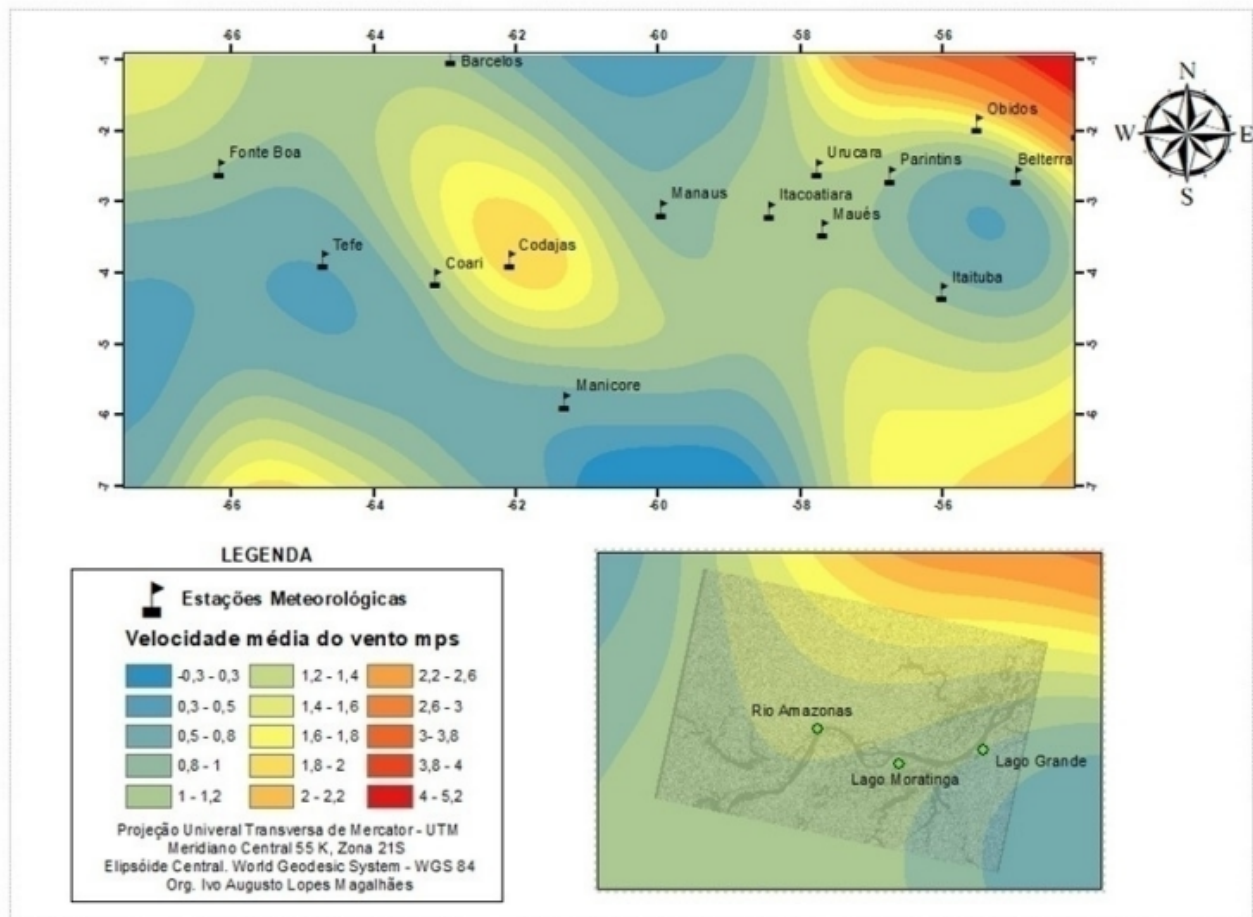
A análise temporal de dois valores de retrostâncias da SAR permite caracterizar o Rio Amazonas, Lago Grande e Lagoa Moratinga com valores entre (-21,49 a -25,78 dB, -22,52 a -28,2 dB e -21,98 a -27,69 dB na polarização VH e -13,34 a -23,27 dB, -18,14 a -24,57 dB e -17,36 a -26,44 dB) para polarização VV (Figura 6).



#fig6pt.jpg

Figura 6 - Gráfico de dois valores de retrocessos de SAR nas polarizações VH e VV no Rio Amazonas, Lagoa Moratinga e Lago Grande na Amazônia Central no período de 26/09/2016 a 08/02/2020.

Os corpos da região apresentam diferentes valores limitantes nas polarizações, com valor médio de -19 dB na polarização VH e -14 dB na polarização VV. Outros estudos em águas abertas obtiveram valores semelhantes (ARNESEN, 2012; FERREIRA, 2018; FROTA, 2019). Entretanto, os valores de retroespalhamento do rio Amazonas foram maiores em ambas as polarizações das lagoas Grande e Moratinga, que apresentaram valores semelhantes em ambas as polarizações (VH e VV). Devido a essa variação, ela pode ser devida aos seguintes fatores: (a) interferência de campos de vento com velocidade variando entre 1,2 a 1,4 MPS no rio Amazonas, superior aos demais lagos (1 a 1,2 MPS), e (b) o fluxo de água contendo ondulações mais significativas no rio e infere uma maior resposta do retroespalhamento SAR (Figura 7). Marinho et al.

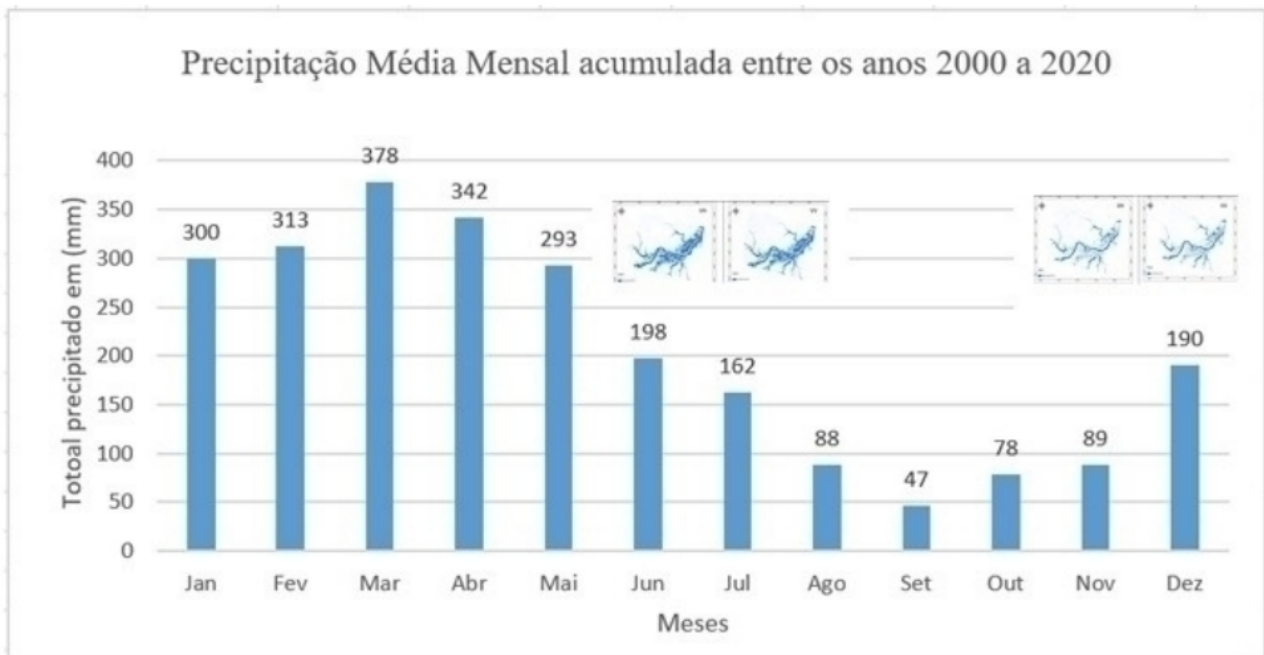


#fig7pt.jpg

Figura 7 - Mapa da velocidade média do vento de 01/09/2016 a 08/02/2020 para a Amazônia Central.

## ANÁLISE DA DINÂMICA DE PRECIPITAÇÃO E PULSO DE INUNDAÇÃO

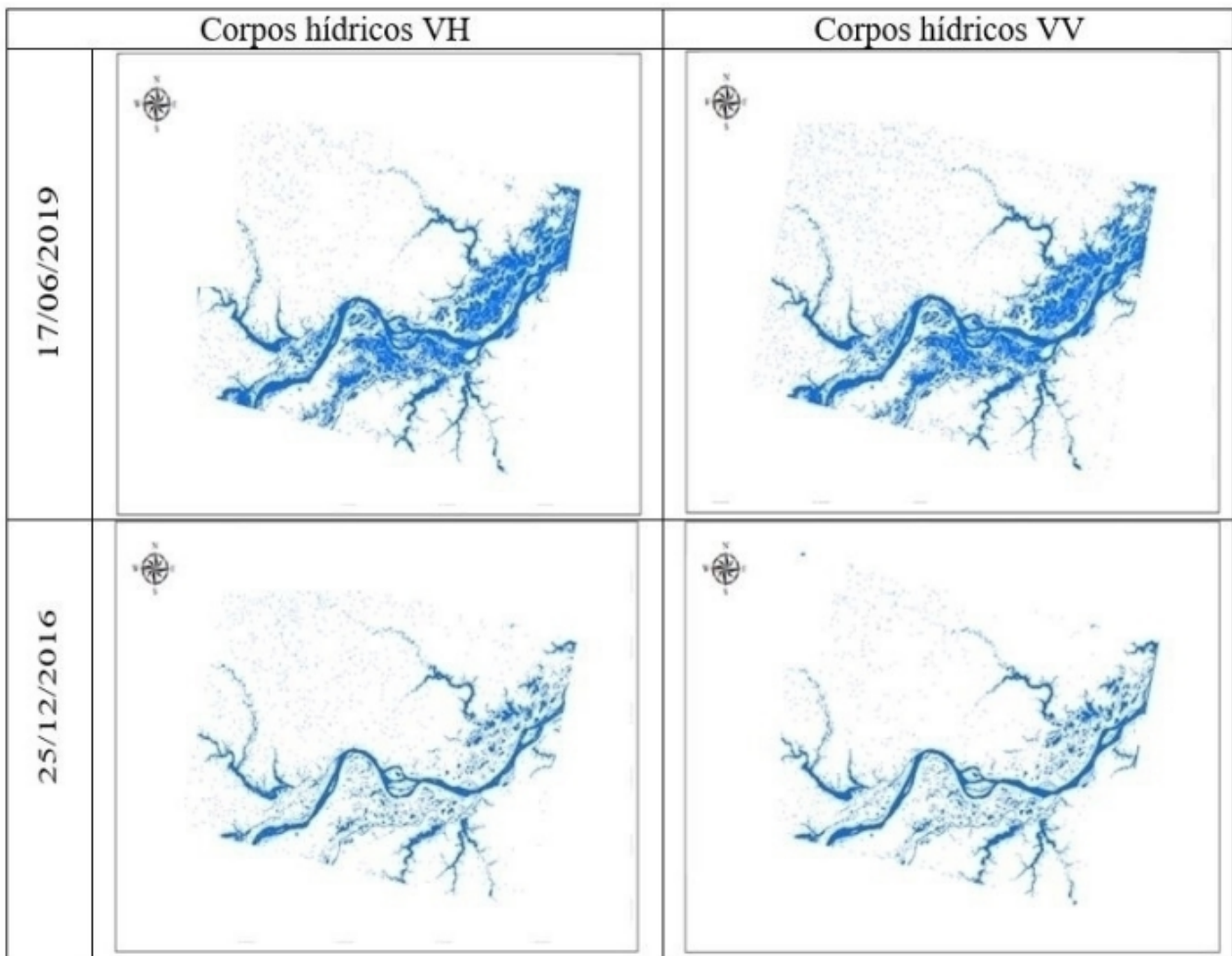
Entre 2000 e 2020, a área de estudo mostrou que as maiores médias de mensagens foram em febre (313 mm/ano), março (378 mm/ano) e abril (342 mm/ano). Os menores valores médios de precipitação foram observados nos meses de setembro (47 mm/ano), outubro (78 mm/ano) e novembro (89 mm/ano) (Figura 8). Os resultados corroboram outros estudos (JUNK, 1997; ARNESEN, 2012) que mostrou um pulso de comportamento monomodal anual no rio Amazonas e seus afluentes, ocorrência previsível ao longo do ano com o período de cheia entre maio e julho e a estiagem entre outubro e dezembro.



#fig8pt.jpg

Figura 8 - Valores pluviométricos na estação Parintins (AM), destacando a maior e menor área coberta dentro da série temporal Sentinel - 1 entre 2000 e 2020.

A maior área de inundação foi registrada em 17 de junho de 2019, com 6.611,86 km<sup>2</sup> representando 16,42% do VH e 6.443,19 km<sup>2</sup> representando 16,10% do VV jantar. A menor área coberta em 25 de dezembro de 2016, com 3.059,75 km<sup>2</sup> representando 7,64% do jantar VH e 2.868,59 km<sup>2</sup> representando 7,17% do jantar VV. As imagens SAR das polarizações (VH e VV) mostram um padrão semelhante entre as áreas afetadas pelos períodos chuvoso e seco, com diferenças praticamente imperceptíveis (Figura 9).

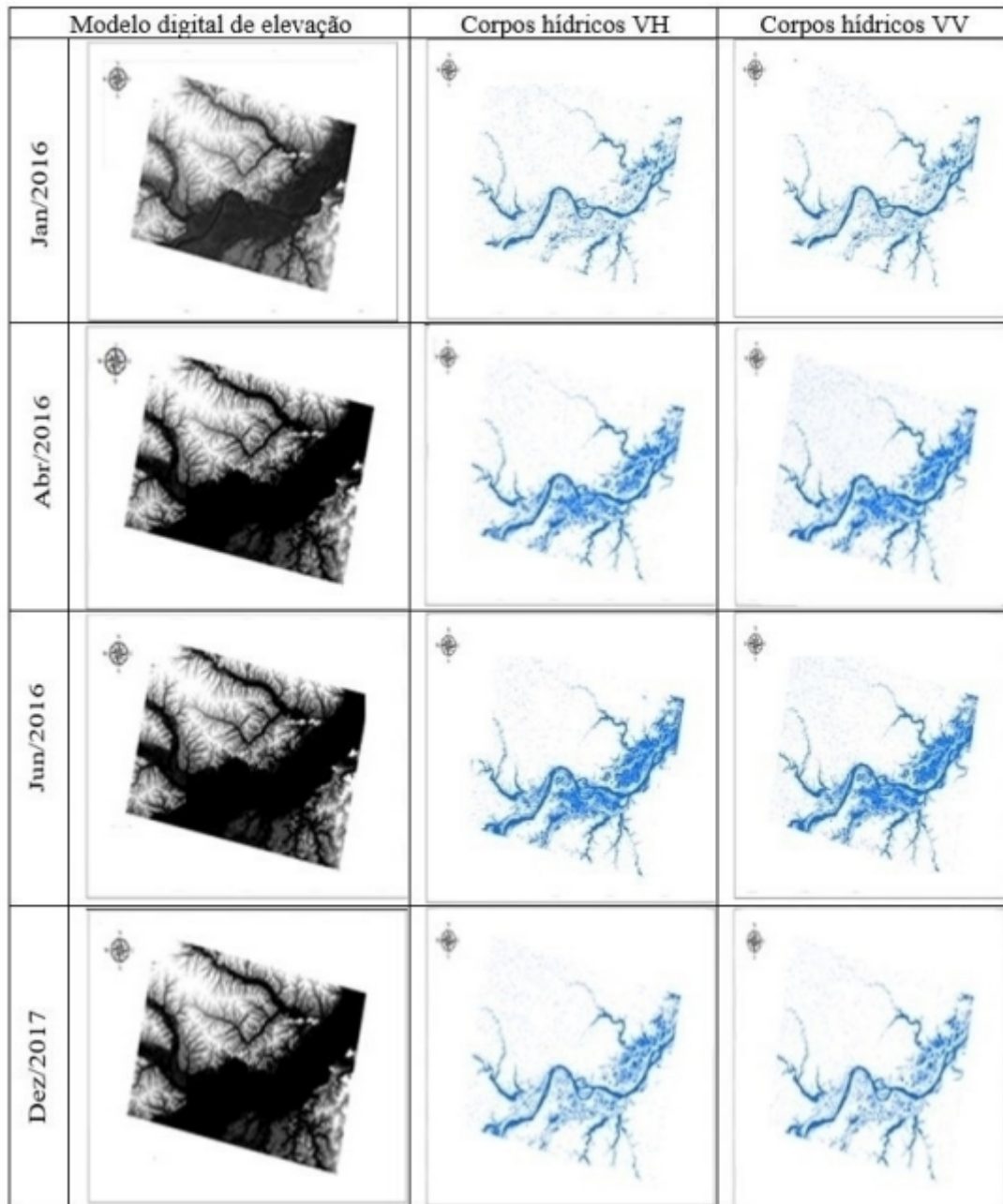


#fig9en.jpg

Figura 9 – Mapa das Corporações de Água da Amazônia Central dos períodos de menor e maior área para os anos de 2016 a 2020 nas polarizações VH e VV do Sentinel-1.

O pulso de cheia na região da Amazônia Central ocorre com um período de arreso entre 3 a 4 meses após o maior volumen de chuvas em março. (2010), o pulso das chuvas da Amazônia está de quatro a seis semanas atrasado em relação ao pico de precipitação na bacia devido ao seu grande tamanho e complexidade hidráulica. Segundo Arnesen (2012), o pulso de cheia origina da precipitação nas nascentes do rio Amazonas, quando massas de ar encontram a Cordilheira dos Andes e ganham magnitude a jusante da bacia hidrográfica, gerando chuvas tropicais.

A Figura 10 mostra a sazonalidade das águas, lagos e afluentes do rio Amazonas entre 2016 e 2017 por meio de imagens SAR nas polarizações VH e VV. A primeira imagem temporal de janeiro apresenta o menor volume de corpos d'água, mostrando continuidade do rio Amazonas e lagos em período de estiagem. A segunda imagem de abril representa um período de transição; Após 4 meses, houve uma mudança significativa no volume dos corpos d'água, onde áreas de menor altitude, vales e afluentes de inundação. Na terceira imagem, o pulso máximo de cheia ocorre em junho, transbordando os corpos d'água pela planície. As várzeas mais extensas permanecem com praticamente o mesmo volume por 3 meses (junho, julho e agosto). Uma área lascada permanece no meio do mar,



#fig10pt.jpg

Figura 10 - Mapa zonal do pulso do rio Amazonas e seus afluentes, em janeiro de 2016, abril, junho e dezembro de 2017.

A elevação mínima no regime fluviométrico foi de 43 cm na imagem de 11/02/2017, e a altura máxima foi de 902 cm na imagem de 17/06/2019. Porém, a média geral foi de 551 cm, compchecking a perpetuidade regional e considerável volume de água (Tabelas 5.1 e 5.2).

Data da Imagem	Cota na Estação (cm)	Área inundada km <sup>2</sup> (VH)	Área inundada km <sup>2</sup> (VV)	Diferença km <sup>2</sup> (VH - VV)
26/09/2016	199	3.212,59	3.910,69	698,10
02/10/2016	170	4.129,09	3.422,44	306,56
14/10/2016	87	3.592,33	3.112,97	479,36
07/11/2016	78	3.701,88	3.266,90	434,98
19/11/2016	79	2.664,99	3.235,6	570,61
13/12/2016	47	3.401,88	3.000,81	401,07
25/12/2016	106	3.059,75	2.868,59	191,16
06/01/2017	260	3.197,43	3.359,09	361,69
30/01/2017	480	3.775,88	3.342,51	433,37
11/02/2017	576	4.225,88	3.759,72	466,16
19/03/2017	748	5.268,08	4.543,67	724,41
31/03/2017	788	5.066,78	4.678,20	388,58
12/04/2017	824	5.401,88	4.874,62	527,26
24/04/2017	850	5.896,42	5.824,30	72,12
18/05/2017	882	5.705,13	5.823,14	35,71
30/05/2017	869	6.103,67	5.861,76	251,91
11/06/2017	859	5.614,82	5.791,11	176,29
23/06/2017	833	6.106,08	6.070,37	118,01
05/07/2017	813	5.683,88	5.433,12	250,76
17/07/2017	780	5.307,53	5.960,31	652,78
10/08/2017	683	5.087,18	5.866,05	778,87
22/08/2017	602	5.311,51	5.791,85	480,34
03/09/2017	467	4.952,00	4.701,58	250,42
15/09/2017	290	4.692,09	5.077,95	385,86
09/10/2017	58	4.168,87	3.599,52	569,35
02/11/2017	43	3.891,61	3.300,61	591
14/11/2017	88	3.463,89	4.276,77	812,88
08/12/2017	175	3.601,09	3.425,46	175,63
20/12/2017	202	3.310,32	3.069,68	240,64

#tab51en.jpg

Tabela 5.1 - Área alagada (km<sup>2</sup>) através da série temporal das imagens do Sentinel 1-SAR nas polarizações VH e VV.

Tabela 5.1 - Área alagada (km<sup>2</sup>) através da série temporal de imagens do Sentinel 1-SAR nas polarizações VH e VV.

Data da Imagem	Cota na Estação (cm)	Área inundada km <sup>2</sup> (VH)	Área inundada km <sup>2</sup> (VV)	Diferença km <sup>2</sup> (VH - VV)
01/01/2018	267	3.655,50	3.220,09	435,41
13/01/2018	349	3.794,80	3.618,55	176,25
25/01/2018	411	3.773,86	3.221,76	552,1
06/02/2018	481	3.861,34	3.881,44	20,1
18/02/2018	551	3.837,37	3.481,74	355,63
02/03/2018	605	4.792,88	3.943,44	849,44
14/03/2018	629	4.588,23	4.001,19	587,04
26/03/2018	636	4.649,36	4.359,04	290,32
07/04/2018	663	5.104,47	4.414,60	689,87
19/04/2018	703	4.836,75	4.815,49	21,26
01/05/2018	743	5.246,10	5.051,08	195,02
13/05/2018	790	5.387,74	5.216,44	171,3
12/07/2018	862	5.193,88	5.291,67	97,79
17/08/2018	738	5.095,88	5.010,89	84,99
22/09/2018	379	4.601,88	4.801,89	200,01
16/10/2018	105	4.201,88	4.078,88	123
21/11/2018	82	3.801,64	3.548,88	252,76
15/12/2018	154	3.401,54	3.779,66	378,12
08/01/2019	353	3.849,88	3.755,65	56
01/02/2019	536	3.543,13	3.771,54	228,41
09/03/2019	693	4.721,21	4.603,88	118
14/04/2019	760	5.201,78	5.287,76	85,98
08/05/2019	894	6.553,21	6.414,89	138,31
17/06/2019	902	6.611,86	6.443,19	158,67
07/07/2019	818	5.801,46	5.956,53	155,07
12/08/2019	674	5.331,24	5.655,79	324,55
29/09/2019	333	4.507,06	4.235,17	271,89
11/10/2019	105	4.203,9	4.101,9	102
16/11/2019	83	3.375,55	3.575,45	199,9
10/12/2019	137	3.424,12	3.260,83	163,29
15/01/2020	341	3.526,74	3.762,71	235,97
08/02/2020	536	3.902,81	3.813,67	89,14

#tab52pt.jpg

Tabela 5.1 - Área alagada (km<sup>2</sup>) através da série temporal das imagens do Sentinel 1-SAR nas polarizações VH e VV.

Tabela 5.1 - Área alagada (km<sup>2</sup>) através da série temporal das imagens do Sentinel 1-SAR nas polarizações VH e VV.

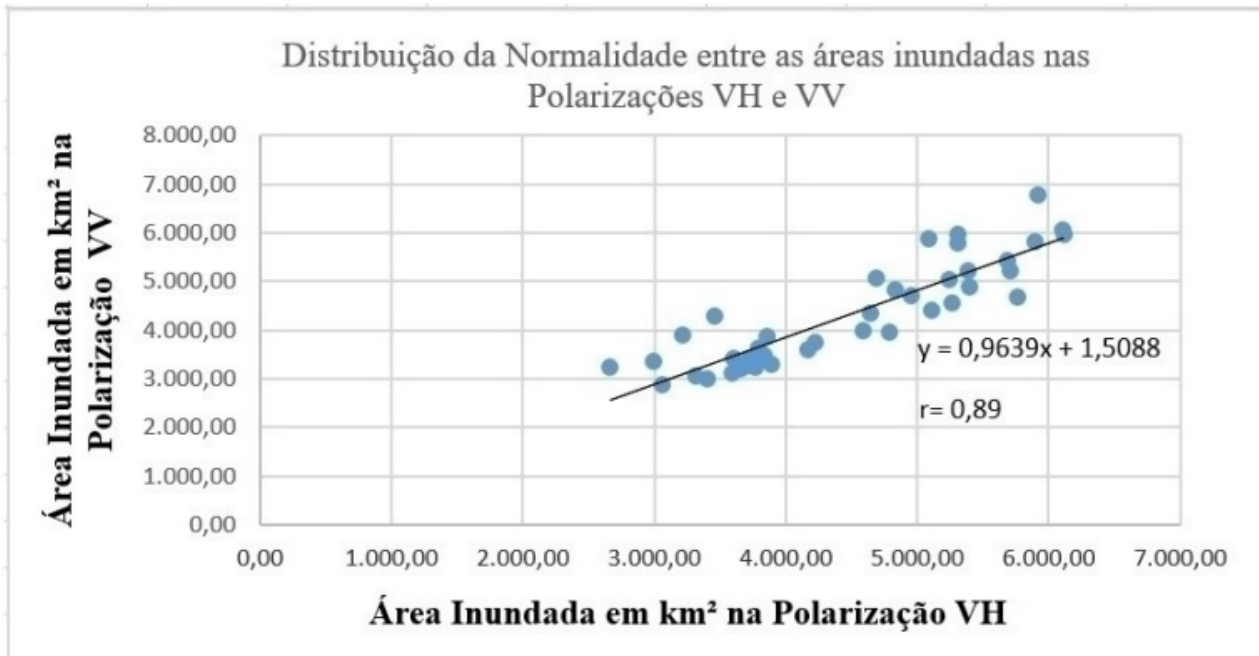
Alguns meses apresentaram aumento ou diminuição brusca no valor da cota do governante, mas pouca alteração ocorreu na área alagada, inferindo que a extensão das cheias não está relacionada apenas ao rio Amazonas, mas também a seus atributos. Os valores medidos da área alagada através das polarizações VH e VV mostraram padrões climáticos aproximados da água, observando que as pequenas diferenças ocorreram durante os períodos de cheia.

Na série histórica, as imagens de polarização VH obtiveram as maiores áreas alagadas no período de cheia. Clemente e outros. (2018), analisando 13 jantares Sentinel-1 na região de Yorkshire, Reino Unido, também obteve áreas de inundação maiores com polarização VH. Segundo Frota (2019), a zona alagada do Rio Negro usando imagens Sentinel-1 na polarização VH (2016 a 2017) superestimou os valores.

De maneira geral, as duas polarizações apresentaram resultados compatíveis com o padrão hidro, sendo um potencial para a definição de áreas alagadas. Da mesma forma, Hess e colaboradores (2015) analisaram a dinâmica das inundações e obtiveram bons resultados na distinção de áreas nas áreas úmidas.

## ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS ÁREAS INUNDÁVEIS

A correlação entre as áreas obtidas pelas imagens SAR nas polarizações VH e VV para o período de estudo obteve um R de 0,89 (figura 11). Durante o período seco, as áreas com água variando de 2 a 3 km<sup>2</sup> apresentam a divergência mais significativa entre as duas polarizações. Áreas de 6 km<sup>2</sup> com maior similaridade, posicionadas próximas a uma linha. O teste de Student indicou normalidade entre os pacientes independentes, confirmando a hipótese de semelhança estatística com valor de 0,70 e teste crítico bicaudal de 1,99.

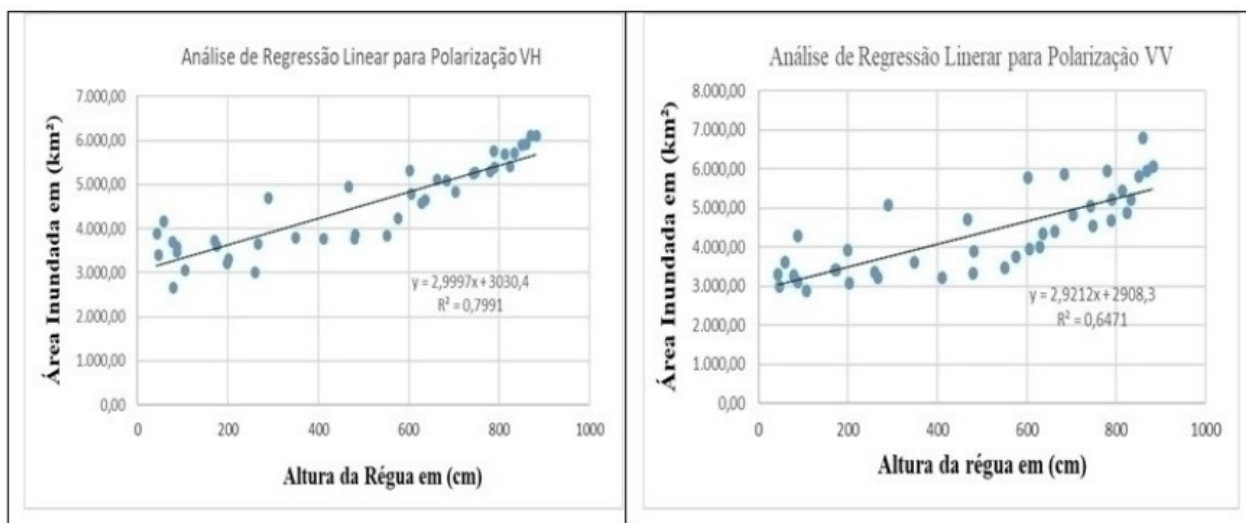


#fig11pt.jpg

Figura 11 - Regressão linear entre as áreas alagadas entre as polarizações VH e VV.

12 mostra a regressão entre o nível da água de Parintins (AM) e as áreas alagadas obtidas pelas imagens de polarização. As linhas de regressão de ambos os modelos são semelhantes, obtendo um R<sup>2</sup> de 0,79 para a imagem VH e um R<sup>2</sup> de 0,64 para a imagem VV. Barbosa e outros. (2006) utilizarão modelos regressivos para estimar as áreas de alagada através da altura do regime fluviométrico, batimetria e imagens Landsat TM no vale da Lagoa Grande do Curai (AM), obtendo um R<sup>2</sup> de 0,99. Esse valor é superior ao obtido neste estudo, provavelmente devido ao maior número de variáveis utilizadas no modelo.

A regressão entre os valores relativos das régua fluviométrica e as áreas alagada apresenta as seguintes características: (a) as diferenças absolutas entre 400 cm e 600 cm; (b) as áreas de inundação na polarização VV são ajustadas para serem melhores entre as alturas da região de 0 a 200 cm; (c) as áreas de inundação na polarização VH são ajustadas para serem melhores entre as alturas de 600 a 1000 cm.

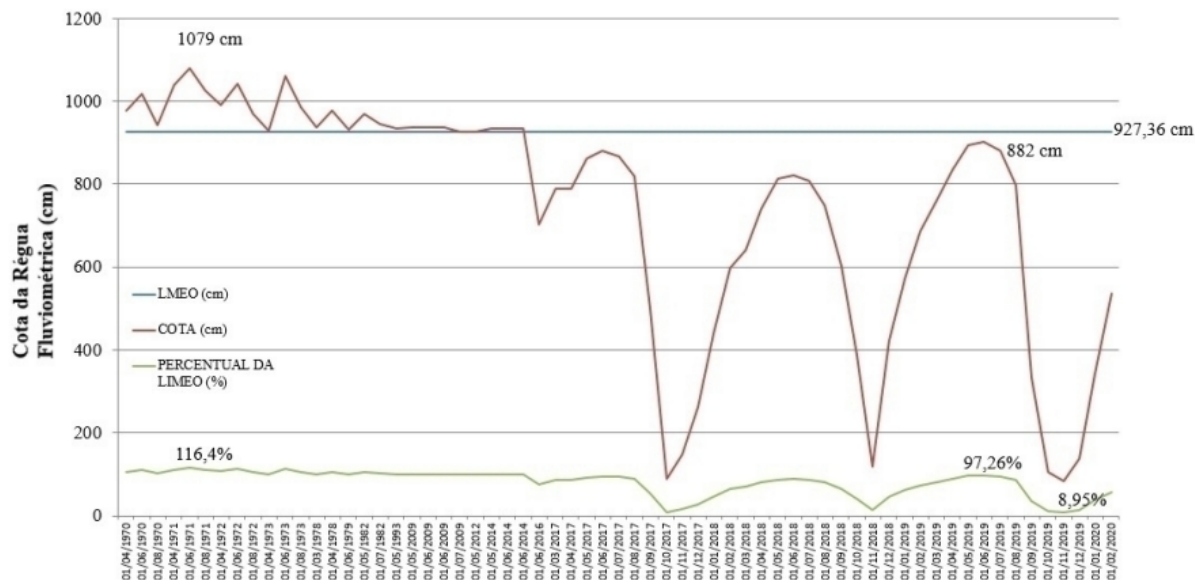


#fig12pt.jpg

Figura 12 - Modelo de regressão linear referente à área de polarização de VH e VV com elevação da régua em Parintins, AM.

### ANÁLISE DA "LINHA DE INUNDAÇÃO COMUM MÉDIA

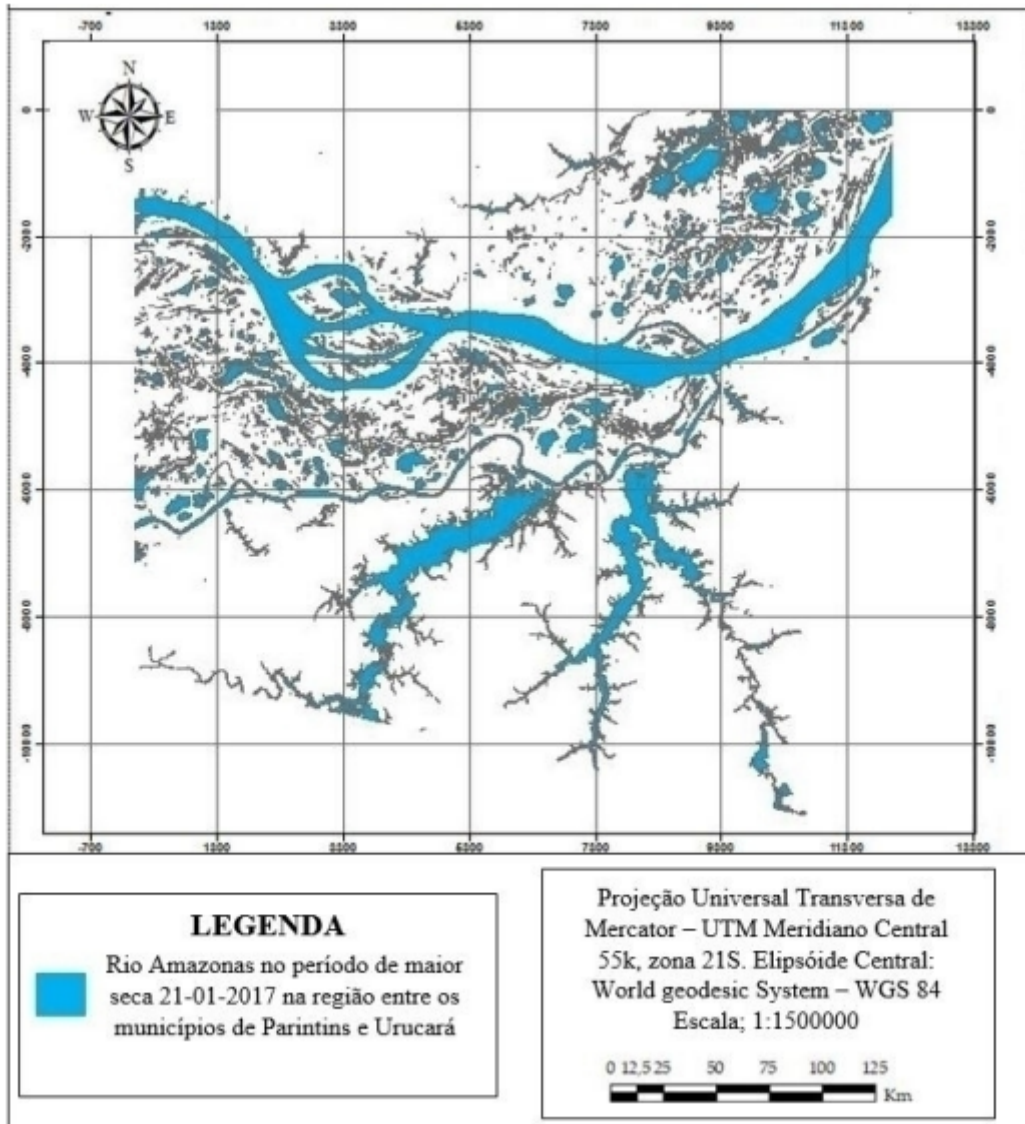
O valor relativo do ALOF observado no regus fluviométrico foi de 927,36 cm. Os eventos de inundação predominaram entre 1970 e 1988, com vários eventos com valores superiores a 927,36 cm. O maior valor medido foi de 1.079 cm em 1º de junho de 1971. Entre julho de 2014 e julho de 2020 (6 anos), as alturas relativas apresentaram valores menores, caindo consistentemente abaixo de 927,36 cm e caindo acentuadamente em junho de 2016 (Figura 13).



#fig13pt.jpg

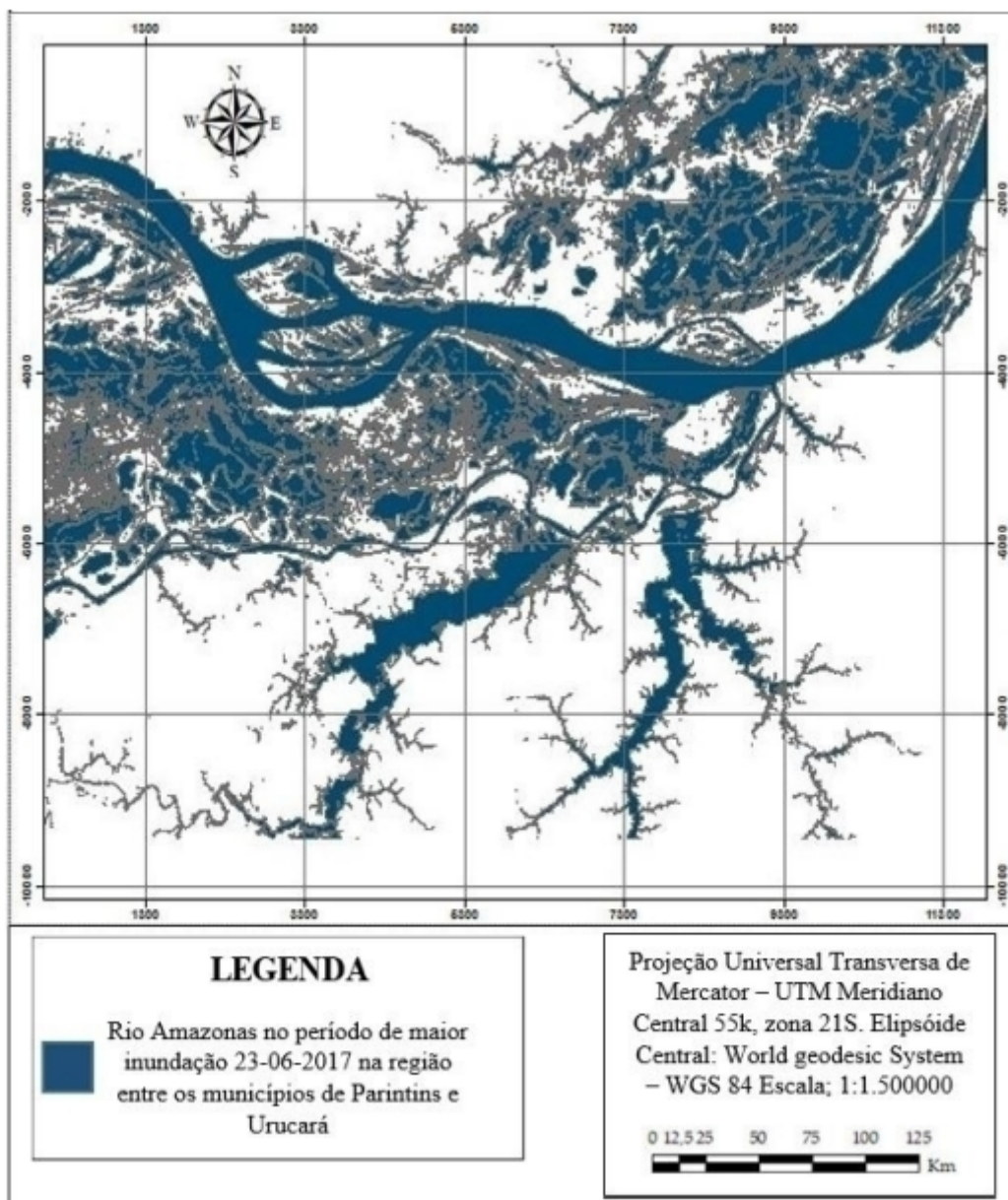
Figura 13 - Gráfico do regime fluviométrico do rio Amazonas entre 1967 e 2020 e o valor relativo do ALOF.

Durante a série temporal Sentinel-1, a menor altura relativa na faixa fluviométrica foi de 83 cm em novembro de 2019 (Figura 14), e o maior valor foi de 902 cm, alcançado em 26 de junho de 2019 (Figura 15). A comparação de dois períodos demonstrou uma expansão significativa do volume de água no rio Amazonas, afluentes e lagos no período de inverno. A extensão do vale apresenta dinâmica diferenciada no período de maior volume de água, com extensão máxima de 30,48 km na margem esquerda e 47,74 km na margem direita do rio Amazonas.



#fig14pt.jpg

Figura 14 – Mapa das áreas alagadas em um trecho do rio Amazonas entre os municípios de Urucara e Parintins, na Amazônia central, durante o período de maior verão registrado pela série temporária de imagens Sentinelá – 1 SAR.



#fig15en.jpg

Figura 15 - Mapa das áreas do Rio Amazonas entre os municípios de Urucara e Parintins, na Amazônia central, durante o período de maior período registrado pela série temporal de imagens Sentinel-1 SAR.

## CONCLUSÃO

Este estudo tem como objetivo apresentar uma abordagem metodológica para o mapeamento de áreas alagadas correlacionadas com estatísticas meteorológicas, e tem se mostrado eficaz no mapeamento de áreas de inundação por meio de técnicas de sensoriamento remoto em séries temporárias de imagens SAR Sentinel-1. Na ausência de imagens SAR Sentinel-1 antes de 2016, quando os eventos de inundação foram maiores do que ALOF (927,36 cm), era impossível delimitar a área de inundação ALOF usando dados SAR. Os modelos de regressão linear obtidos através das polarizações VH e VV apresentaram resultados satisfatórios. No entanto, as áreas de polarização do VH mostraram uma correlação mais significativa com a elevação fluviométrica (79%) do que as imagens de polarização do VV (64%). As áreas de inundação medidas na polarização VH e VV não têm correlação nem significância estatística entre os dois países.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, FC Simulação de Resposta de Estruturas Simplificadas de Vegetação a Radar Interferométrico de Abertura Sintética. Dissertação (Mestrado). São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2008.
- BARBOSA, CCF; NOVO, EMLM; MELACK, JM; FREITAS, RM; FILHO, WP Metodologia para análise da dinâmica de área e volume inundáveis: o exemplo da Várzea do Lago Grande de Curuai. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 1, pp. 24-03, 2006.
- BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, 1998.
- CARVALHO JÚNIOR, OA; SAMPAIO, CS; SILVA, A.C.; QUADRA JÚNIOR FA; GOMES, RATO; CARVALHO, APF; SHIMABUKURO, YE Classificação de Padrões de Cerrado usando assinaturas temporais NDVI do Sensor MODIS no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 26, não. 4, pp. 505-507, 2008.
- Oliveira, J.; FERNANDES, MC; Oliveira, J.; RIBEIRO, M.; DIMICELI, C. Mapeamento de milho e soja nos estados unidos usando conjuntos de dados de séries temporais MODN. *Revista de Agronomia*, v. 99, não. 6, pp. 1654-1664. 2007
- OLIVEIRA, MA; RIBEIRO, C; MOORE, P. Mapeamento de inundação por radar de abertura sintética multitemporal usando detecção de lama. *Revista de Gestão de Riscos de Inundações*, v. 11, pp. 152-168, 2018.
- DALLEMAND, JF; RIBEIRO, J.; RODRIGUES, RIBEIRO; SCHUMANN, R. *Imagens de Radar. Teoria e Interpretação*. Roma: FAO, 118 p. 1993
- OLIVEIRA, A. M.; OLIVEIRA, A. A.; OLIVEIRA, B.; C. Segmentação e Classificação de Áreas Vegetadas Utilizando Dados de Imagem SAR Polarimétrica. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 39, n. 2, p. 321-329, 2001.
- AGÊNCIA ESPACIAL EUROPEIA - ESA. Disponível em:  
< <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>>. Acesso em: 07 jan. 2019.
- FERREIRA, G. H. S. Identificação de áreas inundáveis na porção sur de Roraima com auxílio de imagens de Radar. Dissertação (Mestrado). Brasília: Universidade de Brasília - UNB, 2018.
- OLIVEIRA, G.; OLIVEIRA, C.; OLIVEIRA, M.; OLIVEIRA, A.; ZOUNGRANA, E. Integração de Imagens de Radar de Abertura Óptica e Sintética para Melhorar o Mapeamento de Culturas no Noroeste do Benim, África Ocidental. *Sensoriamento Remoto*, v. 6, n. 7, p. 6472-6499, 2014.
- FROTA, S. M. N. Relação entre área de inundação e cota fluviométrica na sub-bacia do Alto Rio Negro: uma análise baseada em dados de radar (Sentinel-1A). Dissertação (Mestrado). Brasília: Universidade de Brasília - UNB, 2019.
- FURTADO, L. F. A.; SILVA, T. S. F.; NOVO, E. M. L. M. Avaliação SAR de banda C de estação dupla e polarimétrica completa para mapeamento de vegetação em áreas úmidas de várzea amazônica. *Sensoriamento Remoto do Meio Ambiente*, v. 174, p. 212-222, 2016.
- GARDIMAN JÚNIOR. B. S; MAGALHÃES, I. A. L; FREITAS, C. A.; Para; CECÍLIO, R. A. Análise de técnicas de interpolação para espacialização da fusão pluvial na bacia do rio Itapemirim (ES). *Ambiência*, v. 8, n.1, p. 61-71, 2012.
- OLIVEIRA, L. L.; OLIVEIRA, J. M.; OLIVEIRA, A. G.; BARBOSA, C.; RIBEIRO, M.; NOVO, E. M. L. M. Áreas Úmidas da Bacia Amazônica de Terras Baixas: Extensão, Cobertura Vegetativa e Área Inundada de Dupla Estação, Mapeada com Radar de Abertura Sintética JERS-1. *Zonas húmidas*, v. 35, p. 745-756, 2015.

- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: 25 abr. 2020.
- JUNK, W. J. A Várzea da Amazônia Central - Ecologia de um Sistema Pulsante. Nova Iorque: Springer, 1997. Pág. 525.
- LEE, J. S. Aprimoramento de imagem digital e filtragem de ruído por meio de estatísticas locais. IEEE Trans. Análise de Padrões e Inteligência de Máquina, v. 2, n. 2, p. 165-168, 1980.
- OLIVEIRA, J. S.; POTTIER, E. Imagem de radar SAR polarimétrica: do básico às aplicações. Boca Raton: Editora CRC, 2009. 422 págs.
- OLIVEIRA, M.; RAJABI, M.; Para; BLAIS, J. A. R. Efeitos e desempenho de filtros de redução de ruído speckle em imagens ativas de radar e SAR. Revista ISPRS de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, v. 1, p. 1-9 2006.
- MARINHO, R. R.; OLIVEIRA, A. R.; OLIVEIRA, C. D.; OLIVEIRA, C. G. Aplicação de imagens SAR orbitais em desastres naturais: Mapeamento das inundações de 2008 no Vale do Itajaí, SC. Revista Brasileira de Cartografia, v. 64, p. 317-330, 2012.
- MARQUES, J. B. Utilização de uma série temporária de imagens PALSAR-2/ALOS 2 para classificação de uso e cobertura da única e detecção de áreas extremas na região da Ilha do Bananal, trecho médio do Rio Araguaia. Dissertação (Mestrado). Brasília: Universidade de Brasília - UNB, 2017.
- OLIVEIRA, J. M.; HESS, L. L. Sensoriamento Remoto da Distribuição e Extensão de Áreas Úmidas na Bacia Amazônica. Florestas de Várzea Amazônicas. Estudos Ecológicos (Análise e Síntese). Dordrecht Springer, v. 210, p. 43-59, 2010.
- PAPAI, F.; OLIVEIRA, C.; Oliveira, F.; OLIVEIRA, C.; OLIVEIRA, A. B.; MATTHEWS, E. Variabilidade interanual da extensão das águas superficiais em escala global. Revista de Pesquisa Geofísica, v. 115, n. 112, p. 1-17, 2010.
- OLIVEIRA, A. W.; RIBEIRO, L.; TIEN SZE. L.; OLIVEIRA, A.; ZAI, J. M. Comparação de vários filtros de redução de ruído speckle em imagem de radar de abertura sintética. Revista Internacional de Pesquisa em Engenharia Aplicada, v. 11, p. 8760-8767, 2016.
- BRANCH, EUA; MACEDO, J.; VIEIRA, MT; OLIVEIRA, J.; OLIVEIRA, J.; OLIVEIRA, M.; QUEIROZ, HL Ciclo hidrológico nos ambientes de várzea da reserva de desenvolvimento sustentável Mamirauá - Médio rio Solimões, período de 1990 a 2008. UAKARI, v. 5, n.1, pp. 61-87, 2009.
- SECRETARIA DO PATRIMÔNIO DA UNIÃO - SPU. Orientação Norma que regulamenta a demarcação de terras marginais e seus acréscimos (ON-GEADE-03). Relatório, 2001. Disponível em: . Acesso em: jun 2018
- OLIVEIRA, M.; OLIVEIRA, C.; MALLORQUI, JJ Monitoramento automático de vasos com imagens SAR unidimensionais e multidimensionais no domínio wavelet. Revista ISPRS de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, v. 61, pp. 260-278, 2006.