

2017

Segundo Relatório Parcial do emprego de imagens de sensoriamento (radar e óptico) na detecção das áreas inundáveis para as áreas definidas



Laboratório de Sistemas de Informações

Espaciais

LSIE

1/1/2017

Sumário

1. INTRODUÇÃO	2
2. DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMOS PARA DETECÇÃO DE ÁREAS INUNDÁVEIS	4
2.1. Conceito Gráfico do Programa ABILIUS.....	5
2.2. Abrindo uma Imagem.....	6
2.3. Visualizador de Imagem	8
2.4. Filtro 3D (Espaciotemporal)	11
2.5. Módulo de elaboração de máscara com a presença de água	18
3. PROCESSAMENTO DAS IMAGENS TEMPORAIS DO SENTINEL-1 PARA AS ÁREAS DE ESTUDO	21
3.1. Bacia do Xingu	26
3.2. Bacia do rio São Francisco (Remanso).....	28
3.3. São Francisco (Cabrobó).....	32
3.4. Rio Negro (Roraima).....	33
3.5. Rio Negro (Anavilhanas).....	35
3.6. Rio Juruá.....	36
3.7. Rio Branco (Roraima)	37
3.8. Rio Amazonas (região de Parintins)	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1. INTRODUÇÃO

O presente relatório apresenta as evoluções no processamento espaciotemporal das imagens de radar e apresenta os primeiros resultados obtidos referentes a detecção das áreas com cobertura de água. Na etapa de pré-processamento foi explorado o programa livre SNAP, enquanto na etapa de filtragem e detecção da lâmina d'água foi utilizado o programa ABILIUS. Inovações foram propostas considerando a proposição e desenvolvimento de um filtro 3D para suavizar o ruído das imagens de radar. Novos módulos foram desenvolvidos para a realização das máscaras dos corpos d'água ao longo das séries temporais e na construção de um módulo para realizar estatísticas ao longo do tempo ou do espectro. O código de programação utilizou os artifícios de “threads” que subdivide as tarefas computacionais em duas ou mais atividades que são simultaneamente executadas, diminuindo consideravelmente o tempo de processamento. Assim, houve um avanço substancial nas etapas de processamento de dados de radar, que favorece inclusive a transmissão de conhecimento por estarem embasados em programas livres sem custo adicional para utilização.

Em cada área de estudo foram obtidas as imagens Sentinel-1 disponíveis, estando concentradas no período de outubro de 2016 até a atualidade. Todas as imagens da série temporal já foram pré-processadas e delimitados os corpos d'água. Além disso, foram

elaboradas imagens relativas a porcentagem de presença de água ao longo do tempo de estudo e da diferença entre a época de máxima inundação e o período de maior seca. Devido ao curto período de disponibilidade de imagem Sentinel-1, realizou-se também a aquisição e tratamento de áreas com presença de intensa inundação que foi noticiada na imprensa no decorrer do período de estudo. Por exemplo, a região do rio Juruá no Estado do Acre foi incluída como área de estudo por ter tido uma enchente histórica que fez que os municípios de Cruzeiro do Sul, Rodriguez Alves e Mânico Lima decretassem situação de emergência.

2. DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMOS PARA DETECÇÃO DE ÁREAS INUNDÁVEIS

O Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais (LSIE) vem trabalhando a mais de 5 anos em um programa de processamento digital de imagens denominado *Abilius*, dentro das prerrogativas do Governo Federal de favorecer e incentivar o uso e desenvolvimento de programas livres. Assim, o presente tópico aborda as melhorias desenvolvidas no programa *Abilius* de forma a obter funcionalidades aplicadas aos problemas de fiscalização do SPU. Além disso, as soluções encontradas podem ser expandidas para os parceiros institucionais do SPU para garantir o desenvolvimento integrado do processo de fiscalização dentro do Governo Federal e facilitar a transferência de tecnologia para os demais funcionários do órgão. A elaboração de algoritmos dentro de um programa livre permite a fácil reprodução dos dados e o aperfeiçoamento da técnica.

Nesse projeto, foram desenvolvidas as seguintes melhorias no programa: (a) melhoria do procedimento de visualização da imagem, permitindo uma análise temporal de forma integrada; (b) desenvolvimento de filtros convolucionais 3D considerando

dados espaciotemporais, (c) desenvolvimento de método para avaliar o melhor valor de corte, e (d) elaboração de um módulo para elaboração de máscaras das áreas inundáveis ao longo da série temporal, (e) estimativa por pixel de porcentagem de cobertura de água ao longo da série histórica.

2.1. Conceito Gráfico do Programa ABILIUS

O Conceito Gráfico do programa *Abilius* traz semelhanças com a proposta desenvolvida pelo programa ENVI, um dos mais difundidos programas comerciais de processamento de imagens, que é amplamente utilizado em atividades acadêmicas e comerciais. O programa abre uma caixa contendo na parte superior um menu principal e na parte inferior um sistema de lista de bandas disponíveis e procedimentos para visualização de imagens (**Figura 1**).

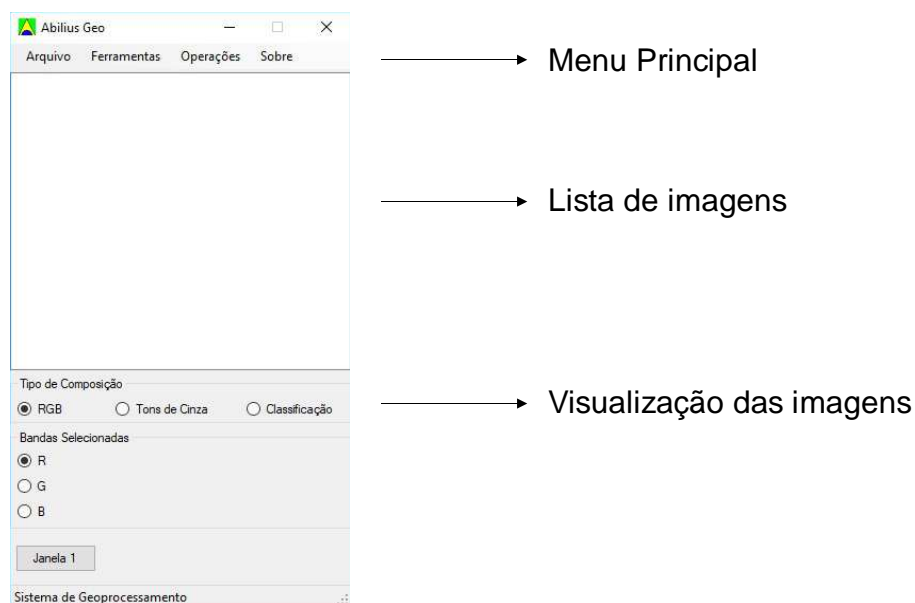


Figura 1 – Menu principal e sistema para listagem e visualização de imagens.

O sistema permite abrir diferentes imagens que ficam listados no formulário principal para futuros processamentos ou visualização. Além disso, diferente dos outros programas do mercado a imagem pode conter a dimensão temporal além das bandas

espectrais. O usuário pode escolher o procedimento de visualização das imagens considerando três diferentes tipos: (a) níveis de cinza, onde cada banda é visualizada independente; (b) composição colorida, realizada a partir da escolha de três bandas nos canais vermelho (R), verde (G) e azul (B); e (c) imagens classificadas, que apresenta as diferentes classes com cores distintas.

2.2. Abrindo uma Imagem

Para efetuar a abertura de uma imagem é necessário realizar as seguintes operações no menu principal (Selecione Arquivo -> *Abrir*). Escolha o diretório e a imagem que deseja visualizar. Após efetuar a abertura, os diferentes tempos e bandas da imagem aparecem na caixa de listagem (**Figura 2**). Para tanto, o usuário deve selecionar o tipo de visualização (RBG, níveis de cinza e classificação) e demarcar com um duplo clique a banda correspondente que deseja visualizar.

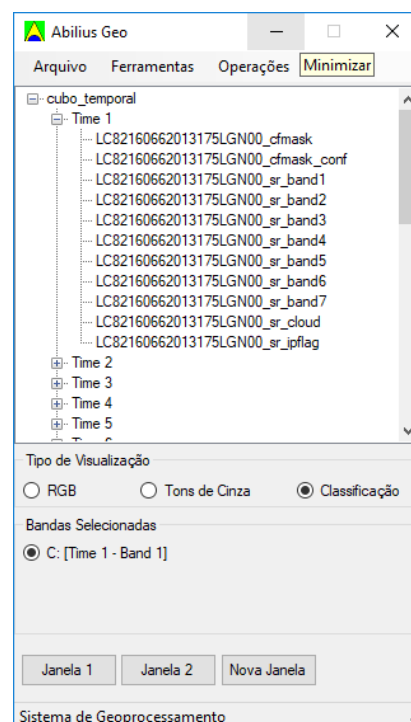


Figura 2 – Listagem da imagem contendo diferentes tempos e bandas.

Observe que o *Abilius* inova em relação aos demais programas que não diferenciam o tempo. Essa abordagem, permite o usuário identificar em uma única

imagem os diferentes tempos e suas bandas espectrais. No caso das imagens temporais, se não houver a divisão por tempos torna-se necessário informá-las, clicando no mouse esquerdo sobre o nome da imagem na listagem do menu principal. Esse procedimento abre a opção de editar o Cabeçalho (Header) (**Figura 3**), que permite alterar os valores de tempos, bandas, linhas e colunas. Imagens contendo séries temporais provenientes de outros programas não diferenciam o tempo, considerando apenas como mais uma banda.

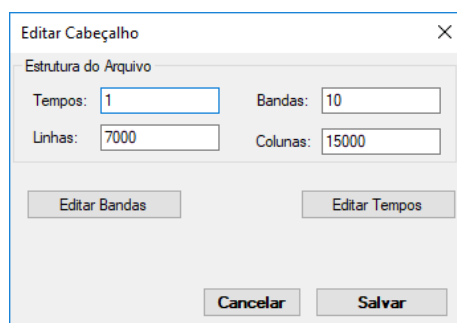


Figura 3 – Caixa de edição do cabeçalho da imagem.

Após a escolha do tipo de visualização e das respectivas bandas, o usuário deve apertar o botão “Janela 1” para abrir um visualizador de imagem (**Figura 4**). O usuário pode abrir ao mesmo tempo mais do que uma janela, podendo ser diferentes imagens ou a mesma, por exemplo, considerando diferentes composições coloridas.

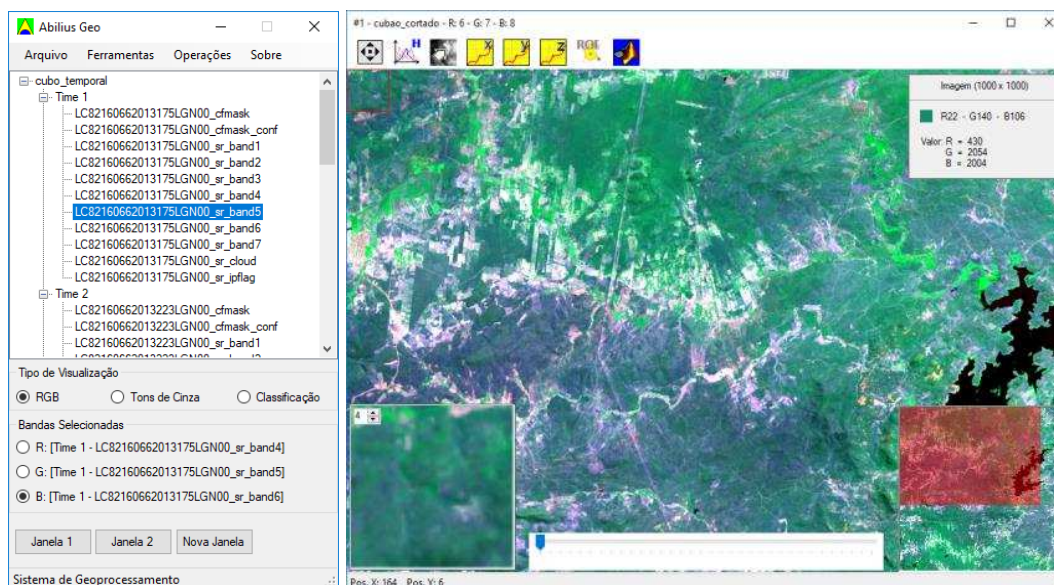










Figura 4 – Escolha das bandas e a abertura do visualizador de imagens.

2.3. Visualizador de Imagem

O visualizador é composto pelos seguintes itens: (a) menu com ícones de procedimentos para aquisição de dados e realce da imagem; (b) três telas referente a imagem em diferentes escalas de visualização, e (c) uma régua temporal. A tabela 1 apresenta os ícones presentes no menu superior com a descrição de suas funcionalidades.

Tabela 1 – Menu de funcionalidades do Visualizador de Imagens.

	Caixa com informações do tamanho da imagem e o valor de nível de cinza, RGB ou de classe que está sendo visualizada.
	Aplicação de realce por histograma
	Perfil em X
	Perfil em Y
	Perfil em Z
	Visualização da superfície espectro temporal (no caso da imagem ter as dimensões espectrais e temporais)
	Captura de espectros para classificação espectral
	Captura de regiões de interesse para classificações supervisionadas

Caixa de informação 

A caixa de informação da imagem permite a detecção automática das informações presentes em um determinado pixel da imagem (**Figura 5**).

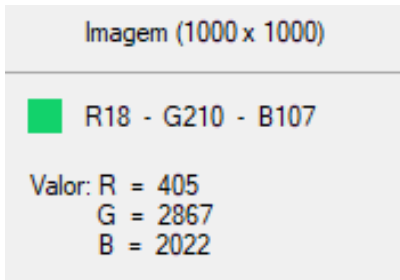



Figura 5 – Caixa de informação da imagem.

Realce a partir da Manipulação de Histogramas 

O programa Abilius apresenta cinco métodos para o realce digital por manipulação de histograma: Linear, Linear (%), Equalização, Histexx, Rampa e Gaussiano (**Figura 6**).

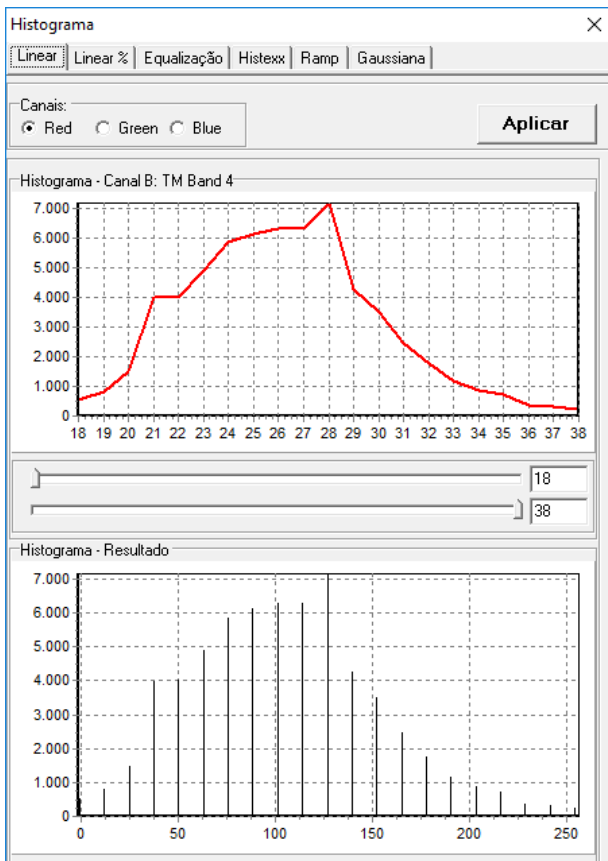


Figura 6 – Módulo para expansão do histograma das imagens em visualização.

Perfil X ou Y

A partir de um determinado pixel escolhido, extrai os perfis na direção X ou Y ao longo da imagem projetada, mostrando as variações dos valores digitais no espaço.

Perfil Z

O perfil Z apresenta o comportamento espectral (variação entre as bandas) para um determinado pixel escolhido dentro do tempo da imagem projetada.

Superfície Espectro Temporal

Mostra para uma superfície contendo as bandas e os diferentes tempos para um determinado pixel. No eixo Y estão as bandas e no eixo X os tempos.



Figura 7 – Imagem da superfície espectro temporal de um pixel.

ROI

Essa ferramenta permite selecionar amostras para efetuar classificações. Será melhor explicado no tópico de classificação de imagens.

Telas de Visualização

O sistema de visualização exibe a imagem em três diferentes escalas. Na parte central é apresentada a imagem, no canto direito uma visão geral da imagem demarcando em vermelho a área central e na parte esquerda uma imagem de zoom.

Régua Temporal

Para imagem composta de séries temporais, essa funcionalidade permite ver os demais tempos de forma simples e rápida, simplesmente movendo o demarcador ao longo da régua temporal. As imagens apresentadas ao longo do tempo apresentam as mesmas especificações estabelecidas durante a abertura da imagem. Desta forma, o programa mantém a mesma composição colorida ou imagem de nível de cinza nos demais.

2.4. Filtro 3D (Espaciotemporal)

O ruído specke deterioram a qualidade das imagens de radar. Este ruído produz imagens com uma textura granulosa e com alta frequência de resposta entre pixels adjacentes. Este comportamento compromete a interpretação visual e também impede que os classificadores delimitem alvos distintos de forma contínua. Os filtros convolucionais bidimensionais vem sendo amplamente utilizados para a eliminação destes ruídos em imagens de radar. Os filtros bidimensionais adotam janelas convolucionais que são sub matrizes de dimensão X por Y pixels que se movem através da imagem. Os filtros buscam preservar o valor médio do retorno do sinal (retroespalhamento), manter as bordas da imagem e os valores referente a textura. A filtragem dos ruídos permitirá uma melhor classificação e segmentação das imagens. Vários filtros convolucionais são utilizados principalmente os de suavização (média aritmética, média geométrica, média harmônica, média contra-harmônica, mediana, ponto médio) e os adaptativos (Frost, Lee, Kuan, Map Gamma).

Mais recentemente filtros tridimensionais vêm sendo utilizados para eliminação de ruídos em imagens proveniente de tomógrafos. Manfredi et al. (2017) utilizaram um filtro cúbico de Kernel no qual remove pontos isolados, mantendo os valores originais da imagem. A utilização do filtro em três dimensões em imagens de radar é inédita na literatura científica. O cubo temporal convolucional permite que o filtro seja aplicado

conjuntamente utilizando informações espaciotemporais. Este procedimento apresenta resultados muito melhores quando comparados aos filtros bidimensionais porque a determinação do novo valor do pixel a partir da filtragem é calculada com muito mais informações, ou seja, em um filtro bidimensional 3x3, o valor do pixel central é calculado a partir de nove pixels, entretanto, um filtro tridimensional 3x3x3, o valor do pixel será calculado a partir dos 27 pixels contidos dentro da janela.

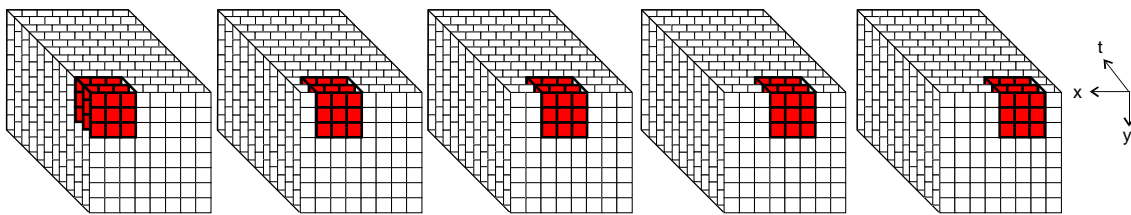


Figura 1 - Janela convolucional 3D considerando uma série temporal de imagens com as direções espaciais “x” e “y” e a direção temporal “t”.

A filtragem para eliminar ruídos (ou suavização) necessariamente reduz a resolução espacial (aumenta o tamanho da célula de resolução) dos dados SAR. A perda da resolução espacial interfere na capacidade de detecção dos corpos d’água em suas margens, fator primordial no estudo de inundações. Entretanto, o emprego do filtro 3D permite uma acentuada suavização sem uma significativa perda de resolução espacial, uma vez que compartilha essa perda com a dimensão temporal. Essa característica do filtro 3D possui vantagem sobre o filtro 2D tradicionalmente utilizado. Por exemplo, um filtro 3D de dimensão 5x5x5 (125 pixels) equivale a um filtro 2D de dimensão 11x11 (121 pixels) que produz um forte impacto na resolução espacial.

No presente estudo, filtros espaciotemporais (3D) foram desenvolvidos dentro do programa Abilius considerando métodos de suavização por valores estatísticos centrais e filtros adaptativos. Na programação dos métodos de filtragem foram adotados “threads” para melhorar a performance de processamento, onde o processo é dividido em

duas ou mais tarefas que são executadas simultaneamente. No programa *Abilius* o módulo de filtragem 3D pode ser acessado a partir da seguinte sequência: Operações -> Filtros -> 3D (Figura x). Dentro dos Filtros 3D estão presentes os filtros de suavização (média, mediana, média geométrica, média harmônica, média contra-harmônica, Ponto Médio, Média Yp, Média Alpha-Trimmed Interior, Média-Trimmed Exterior), os filtros adaptativos (MMSE, Frost, Kuan, Lee Realçado e Lee) e os filtros estatísticos (variância e desvio padrão).

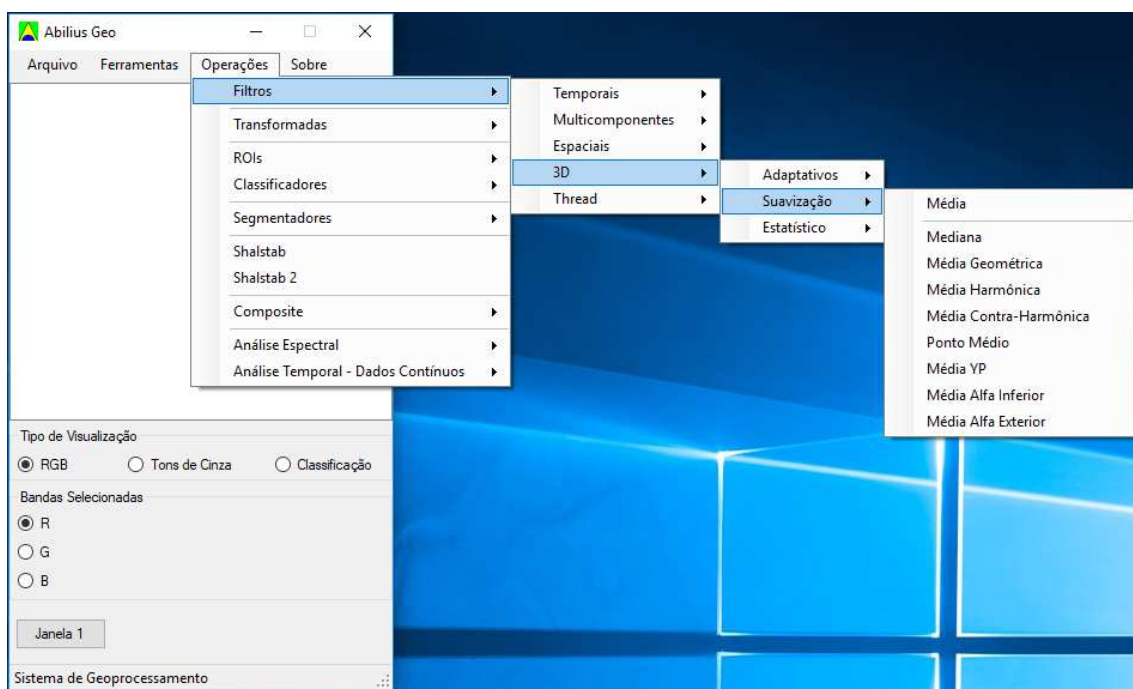


Figura 2 – Demonstração no menu do programa do posicionamento dos filtros 3D.

A **Tabela 1** apresenta as diferentes métricas utilizadas no cálculo dos filtros de suavização, considerando as três dimensões da imagem: “x” e “y” como dimensões espaciais e o “t” como dimensão temporal. A largura da janela 3D é definida pelo usuário, sendo que “x” varia de 1 até “k”, “y” de 1 até “l” e “t” de 1 até “m”. Assim, a máscara 3D “M” possui um volume em pixels igual a “n” expresso por $k \cdot l \cdot m$. Na formulação dos filtros de média geométrica, ponto central e mediana considera-se as coordenadas x, y, z definidas sobre uma máscara “M”. No filtro de mediana e de alpha-

trimmed mean, todos os pixels contidos dentro da janela “M” são ordenados do valor mínimo para o máximo. No filtro de média alpha-trimmed, o parâmetro “P” determina o número de pixels que são eliminados a partir dos dados ordenados, considerando os dois extremos da fila numérica.

Tabela 1 – Formulação dos Filtros 3D de suavização.

Filtro de Média Aritmética	$R = \frac{1}{klm} \sum_{x=1}^k \sum_{y=1}^l \sum_{t=1}^m a_{(x,y,t)}$
Filtro de Média Geométrica	$R = \left(\prod_{x,y,t \in M} a_{(x,y,t)} \right)^{1/n}$
Filtro de Média Harmônica	$R = \frac{klm}{\sum_{x=1}^k \sum_{y=1}^l \sum_{t=1}^m \frac{1}{a_{(x,y,t)}}}$
Filtro de Média Contra-Harmônica	$R = \frac{\sum_{x=1}^k \sum_{y=1}^l \sum_{t=1}^m a_{(x,y,t)}^{p+1}}{\sum_{x=1}^k \sum_{y=1}^l \sum_{t=1}^m a_{(x,y,t)}^p}$
Filtro de Ponto Central	$R = \frac{1}{2} [\max\{a_{x,y,t}\} + \min\{a_{x,y,t}\}] \text{ onde } x, y, t \in M$
Filtro de Média Y_p	$R = \left(\frac{\sum_{x=1}^k \sum_{y=1}^l \sum_{t=1}^m a_{(x,y,t)}^p}{klm} \right)^{1/p}$
Filtro de Mediana	$R = \text{median}\{a_{x,y,t}\}, \text{ onde } x, y, t \in M$
Filtro de Média Alpha-Trimmed Interior	$R = \frac{1}{n - 2p} \sum_{i=p}^{n-p} a_i$
Filtro de Média Alpha-Trimmed Exterior	$R = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p a_i + \frac{1}{p} \sum_{i=n-p}^n a_i$

Os filtros adaptativos desenvolvidos inicialmente para uma máscara 2D foram adaptados para uma máscara 3D. Esses filtros apresentam as seguintes características: (a) adota uma função matemática que considera as propriedades locais da retroespalhamento do terreno; (b) muda com o tipo de alvo, e (c) o ruído (speckle) é modelado como sendo estacionário. Os filtros adaptativos diferem dos filtros de suavização que não consideram as propriedades locais, adotando um procedimento constante para toda cena.

Filtro Frost

O filtro Frost utiliza uma simetria circular de amortecimento exponencial a partir de estatísticas locais dentro das janelas (coeficiente de variação ao quadrado) e um fator de amortecimento que reduz o ruído e preserva a borda. O filtro de Frost é descrito pela seguinte equação:

$$R = (P_1 * K_1 + P_2 * K_2 + \dots + P_n * K_n) / (K_1 + K_2 + \dots + K_n)$$

sendo

$$K = e^{(-B * S)}$$

$$B = D * (L_v / L_m * L_m)$$

Onde “S” é o valor absoluto da distância euclidiana do pixel central para os seus vizinhos no filtro considerando as três dimensões, L_m é a média local da janela, L_v é a variância local da janela, e D é fator de amortecimento exponencial definida pelo usuário. A suavização é maior quanto menor for o valor de D , normalmente é utilizado o valor 1 como padrão.

Filtro Kuan

O filtro de Kuan é descrito pela seguinte equação:

$$R = P_C * K + L_M * (1 - K)$$

sendo

$$K = (1 - ((C_U * C_U) / (C_I * C_I))) / (1 + (C_U * C_U))$$

$C_U = 1 / \text{sqrt}(N\text{Looks})$ —Coeficiente de variação do ruído

$C_I = \sqrt{L_V} / L_M$ — Coeficiente de variação da imagem

Onde L_m é a média local da janela, L_v é a variância local da janela, e N_{Look} é o número de looks definida pelo usuário. O número de looks é uma estimativa da variação do ruído e controla a suavização aplicada à imagem pelo filtro, onde um menor valor provoca uma maior suavização.

Filtro Lee Aditivo

O filtro Lee possui três modelos considerando o tipo de ruído presente: (a) aditivo, (b) multiplicativo, e (c) aditivo e multiplicativo.

O modelo aditivo é expresso pela seguinte expressão:

$$R = L_M + K * (P_C - L_M)$$

sendo

$$K = L_V / (L_V + AV)$$

Onde P_C é o valor do pixel central da janela e AV é a variância do ruído aditivo fornecida pelo usuário.

Filtro Lee Multiplicativo

A formulação do modelo multiplicativo é descrita como:

$$R = L_M + K * (P_C - \mu * L_M)$$

Sendo:

$$K = \mu * L_V / ((L_M * L_M * MV) + (\mu * \mu * L_V))$$

$$MV = 1 / N_{\text{Looks}}$$

Onde “Mu” é a média do ruído multiplicativo e “MV” é a variância do ruído calculado a partir do NLooks (número de looks). Os parâmetros MV e o NLooks são ambos fornecidos pelo usuário.

Filtro Lee Aditivo e Multiplicativo

O modelo aditivo e multiplicativo é expresso pela seguinte expressão:

$$R = L_M + K * (P_C - \text{Mu} * L_M - A)$$

sendo

$$K = \text{Mu} * L_V / ((L_M * L_M * MV) + (\text{Mu} * \text{Mu} * L_V) + AV)$$

$$MV = (SD / L_M)^2$$

Onde A é a média do ruído aditivo e SD é o desvio padrão da janela 3D do filtro.

Filtro Gamma

O filtro Gamma é usada principalmente em dados de radar para remover ruídos de alta frequência, preservando as feições de borda de alta frequência, tais como detalhes lineares. O número de looks da imagem do radar estabelecido do usuário é usado para calcular a variância do ruído.

O filtro adota equações diferentes de acordo com as seguintes condicionais:

$$R = I, \text{ se } C_i \leq C_u;$$

$$R = (B * I + \text{SQRT}(D)) / (2 * \text{ALFA}), \text{ se } C_u < C_i < C_{\text{max}}; \text{ e}$$

$$R = P_C, \text{ se } C_i > C_{\text{max}}$$

onde:

NLOOK = number of looks

$$C_u = 1/\text{SQRT}(\text{NLOOK})$$

$$C_i = \text{SQRT}(L_v)/I$$

$$C_{\max} = \text{SQRT}(2)*C_u$$

$$\text{ALFA} = (1 + C_u^{**2})/(C_i^{**2} - C_u^{**2})$$

$$B = \text{ALFA} - \text{NLOOK} - 1$$

$$D = L_M * L_M * B * B + 4 * \text{ALFA} * \text{NLOOK} * L_M * P_C$$

2.5. Módulo de elaboração de máscara com a presença de água

Visando a detecção das áreas com presença de água a partir de um valor limite ou intervalo de valores foi desenvolvido um módulo para elaboração de máscaras para as séries temporais. O presente método pode ser acessado a partir de Ferramentas -> Máscara (**Figura 3**).

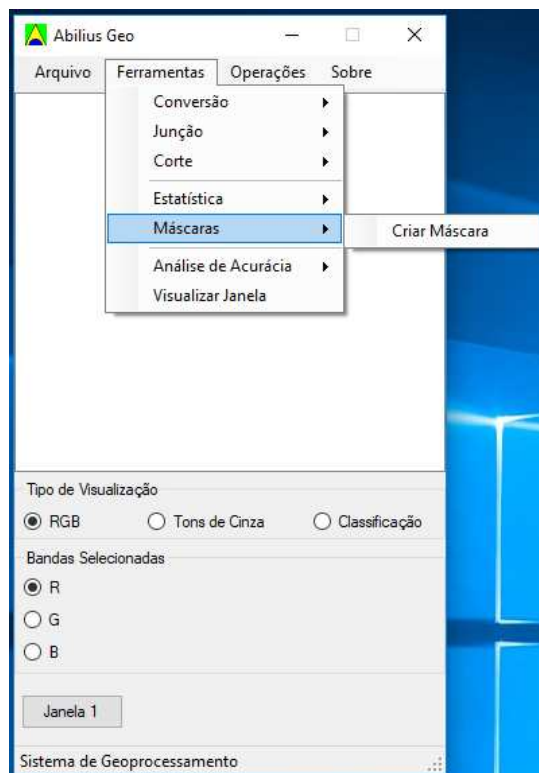


Figura 3 – Posição no Menu Principal do Módulo de Máscara.

Esse método permite definir um valor único para toda série temporal (considerando diferentes bandas e tempos) ou especificar valores para elaboração da máscara a partir da banda, tempo ou ambos. Portanto, torna-se possível construir uma série de máscaras a partir de séries temporais com valores distintos para as bandas ou tempos diferentes. A **Figura 4** demonstra a operacionalidade para definir para cada tempo da série temporal valores distintos. Essa operacionalidade facilita a definição de valores limites de presença de água considerando bandas distintas de radar.

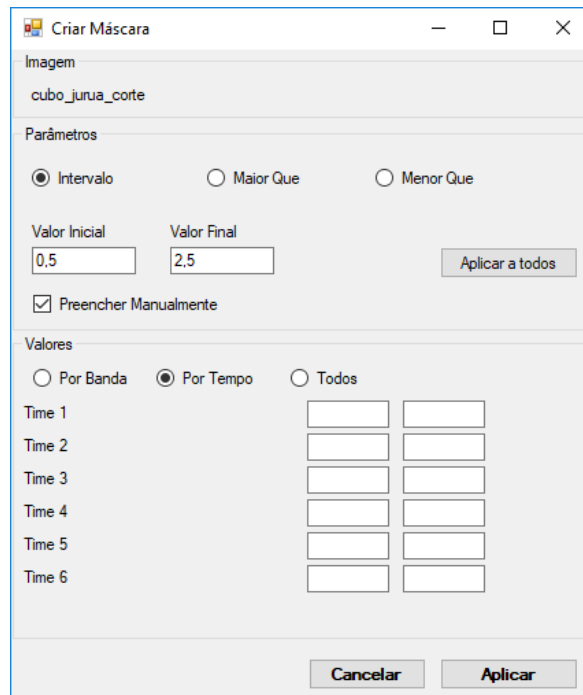


Figura 4 – Operação de criar máscara no programa Abilius.

3. PROCESSAMENTO DAS IMAGENS TEMPORAIS DO SENTINEL-1 PARA AS ÁREAS DE ESTUDO

As imagens obtidas pelo Sentinel-1 das áreas de estudo foram adquiridas em polarização VH (mais adequada para a detecção de corpos d'água) na região espectral de ondas longas, que compreende a banda C (30 cm de comprimento de onda) e corresponde ao produto *Ground Range Detected* (GRD). As imagens foram pré-processadas utilizando o programa livre SNAP (Sentinel Application Platform) e processadas no programa Abilius. As etapas de pré-processamento são amplamente utilizadas no tratamento das imagens SAR (ENGDAHL et al., 2012, RAHMAN & SUMANTYO, 2010; FURTADO et al., 2013). As seguintes etapas de processamento foram adotadas: (a) aplicação do arquivo de órbita; (b) calibração absoluta; (c) correção geométrica (*Range-Doppler Terrain Correction*); (d) conversão para decibéis (db); (e) elaboração do cubo 3D; (f) filtragem 3D; (g) confecção das máscaras dos corpos d'água; e (h) álgebra de mapas salientando a variação do nível de água ao longo do tempo (**Figura 3.1**).

A aplicação do arquivo de órbita disponíveis dias a semanas após a geração do produto com informações precisas de posição e velocidade do satélite permite refinar os vetores das condições da órbita fornecidos nos metadados de um produto SAR que normalmente são pouco precisos. Com base nessas informações, os vetores de condições da órbita nos metadados do produto são atualizados (MAHAPATRA & HANSSSEN, 2011).

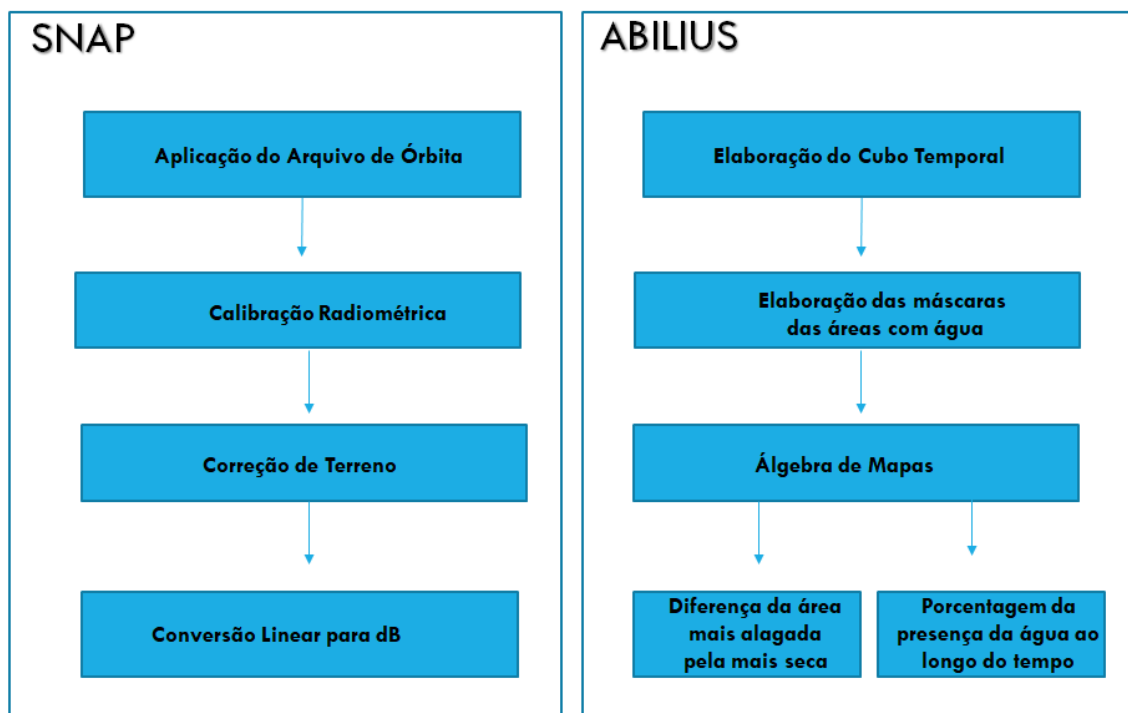


Figura 3.1. Fluxograma das etapas de processamento utilizando o programa SNAP e o Abilius.

A calibração absoluta do SAR busca fornecer imagens com valores de pixels diretamente relacionados ao retroespalhamento das superfícies refletidas. Essa calibração das imagens SAR é essencial para o uso quantitativo e para estudos que comparam imagens de séries temporais. Normalmente, as imagens do Nível 1 não possuem correção radiométrica (MAHAPATRA & HANSSSEN, 2011). O programa

SNAP determina automaticamente o tipo de produto de entrada e quais correções são necessárias de ser aplicadas com base nos metadados do produto (VECI, 2016).

A correção do terreno Range-Doppler nas imagens foi realizada usando o DEM SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) da região. O método adota o método de ortorectificação range-Doppler para geocodificar imagens SAR a partir de uma geometria de uma imagem radar 2D. O método utiliza as informações vetoriais de estado da órbita disponíveis nos metadados, as anotações de tempo de radar, os parâmetros de conversão de inclinação para terra e os dados de referência de DEM para obter informações de geolocalizações precisas (MAHAPATRA & HANSSEN, 2011).

A partir das imagens corrigidas foram elaborados cubos temporais para cada área de estudo. O cubo de imagens temporais apresenta nos eixos “x” e “y” as coordenadas geográficas e no eixo “z” o perfil temporal das imagens SAR (**Figura 3.2**). As imagens são ordenadas no cubo temporal na sequência dos dias do ano em ordem crescente. A **Tabela 3.1** demonstra a quantidade de cenas e imagens utilizadas em cada área de estudo, considerando o intervalo temporal de outubro de 2016 até outubro de 2017. A **Figura 3.3** demonstra a nomenclatura das imagens Sentinel-1, sendo importante para o ordenamento das imagens.

Os filtros 3D descritos no tópico anterior foram aplicados nas séries temporais de forma a reduzir os ruídos (speckle) que prejudicam a classificação da imagem. O ruído é causado pela interferência destrutiva e aditiva do sinal de retorno do radar para cada célula de resolução. No presente trabalho, diversos filtros 3D adaptados de filtros 2D foram utilizados para atenuar o efeito destes ruídos.

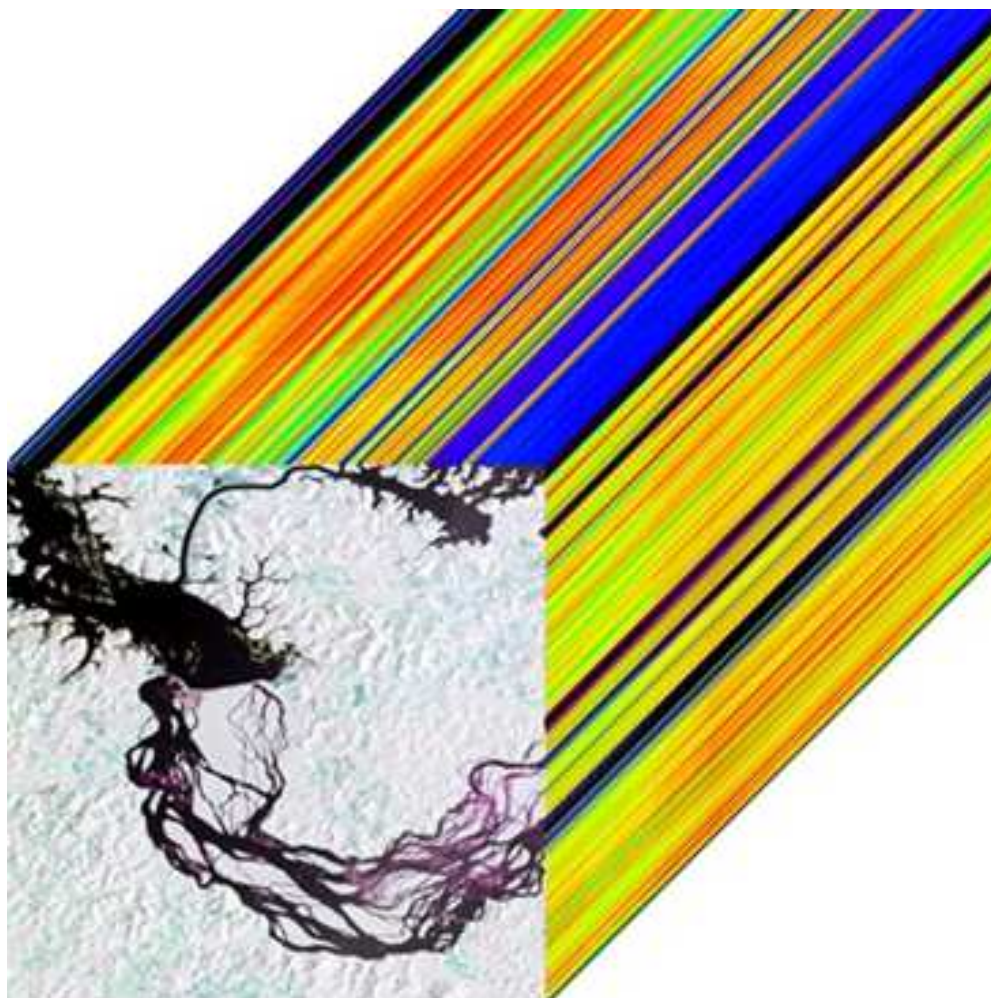


Figura 3.2. Cubo temporal de imagens SAR filtradas.

Tabela 3.1 – Imagens do Sentinel-1 utilizadas nas áreas de estudo.

	Qtd de Cenas	Qtd de Imagens
Rio Xingu (Belo Monte)	2	68
São Francisco (Pilão Arcado)	1	17
São Francisco (Cabrobó)	1	29
Rio Negro (Roraima)	1	33
Rio Negro (Anavilhanas)	1	29
Rio Juruá	1	67
Rio Branco (Roraima)	1	20
Rio Amazonas (região de Parintins)	1	29

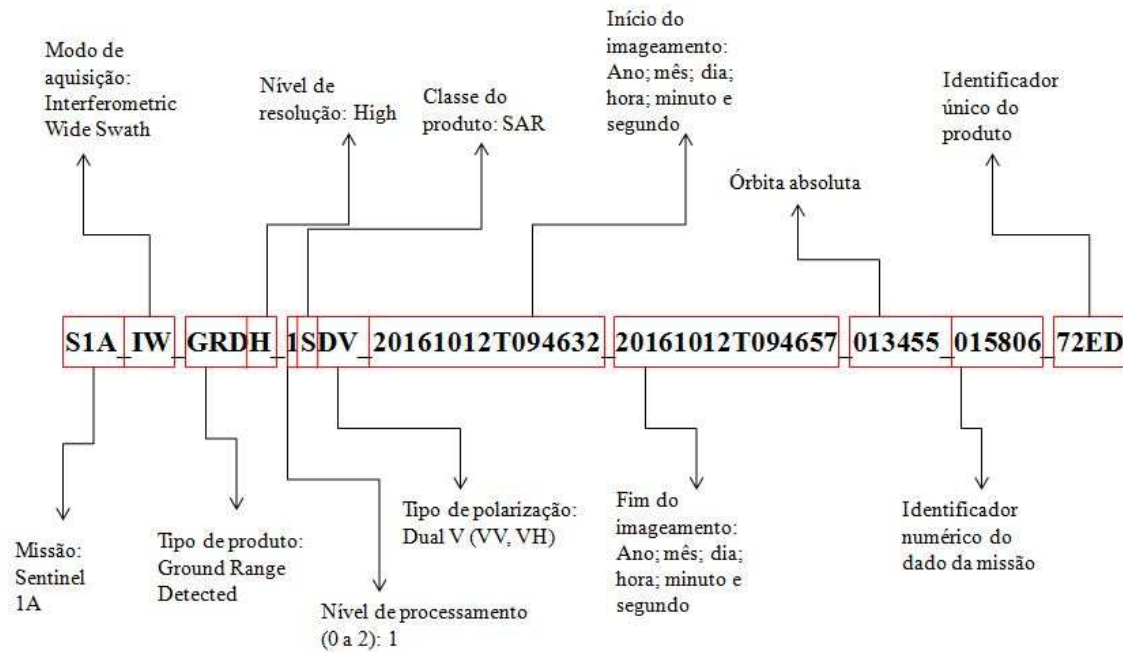


Figura 3.3. Nomenclatura das imagens Sentinel-1.

Nas séries temporais filtradas foram elaboradas máscaras temporais relativas as áreas inundadas, considerando um valor de corte inferior que -20 db. A **Figura 3.4** demonstra o histograma de frequência contendo as áreas com cobertura de água nos baixos valores da banda VH. Observa-se que as áreas de água apresentam um pequeno aumento de frequência em -25db. O emprego da máscara permitiu construir uma série temporal com a demarcação dos corpos d'água. Com objetivo de gerar uma única imagem que descreve o comportamento do nível d'água foi calculado a porcentagem da presença de água (PA) ao longo de todo o período estudo. O procedimento consiste na seguinte álgebra de mapa:

$$PA = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Máscara}}{n} * 100$$

Onde “n” é o número de imagens de máscaras utilizadas. Além disso, foram calculadas as diferenças entre a imagem de maior e a menor extensão de água.

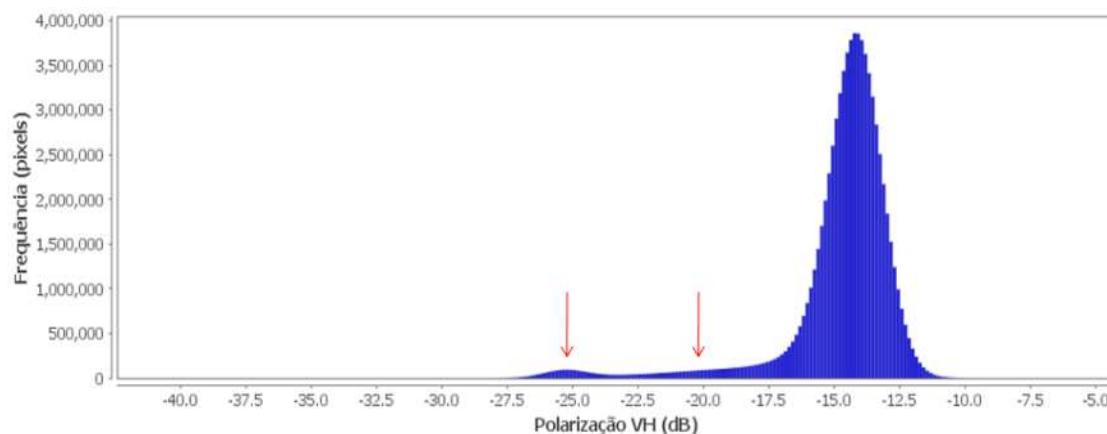


Figura 3.4. Histograma de frequência da banda C (VH) demonstrando a faixa contendo a presença de água.

A presente metodologia foi aplicada para todas as áreas de interesse presentes no projeto, além de incluir a área do rio Juruá que teve um forte evento de enchente. Outras áreas no Rio Grande do Sul e Pernambuco que foram afetadas por enchentes também estão sendo processadas e serão incluídas no relatório final.

3.1. Bacia do Xingu

Essa área de estudo enfoca o curso principal do rio Xingu ao longo da área de influência direta e indireta da UHE Belo Monte, abarcando desde a Volta Grande do Xingu até o município de Porto de Moz entre as latitudes 1°30'S e 4°00'S e as longitudes 51°00'W e 52°40'W. As imagens de radar refletem as intensas e recentes mudanças provocadas com as obras da UHE Belo Monte. A **Figura 3.5 e 3.6** apresentam a imagem da porcentagem de cobertura de água no período de estudo que demonstra a dinâmica e a mudança do comportamento fluvial na região. A Figura 3.4 do detalhe da imagem de porcentagem evidencia as zonas do rio que estão em processo de secagem. Observa-se que os ambientes aquáticos da Volta Grande do Xingu foram diretamente afetados, com diminuição crescente da dinâmica fluvial. O desvio do fluxo da água para a construção da barragem conduz a água pelos canais de derivação,

provocando a redução da vazão em um trecho de 100km de extensão. Além disso, na região da inundação do lago da barragem observa-se variações nas regiões marginais.

Essas mudanças vêm comprometendo seriamente o ecossistema, interferindo na vida e na cultura dos índios e das populações tradicionais. Dentre elas pode-se elencar a perda de micro-habitats que dependem do ciclo de cheia e seca para prover alimentos e ambientes de reprodução de peixes; a restrição à navegação na Volta Grande feita anteriormente por populações tradicionais; a alterações na turbidez da água e das vegetações afetando diretamente a vida dos peixes, índios, pescadores e ribeirinhos (MAGALHÃES et al., 2016).

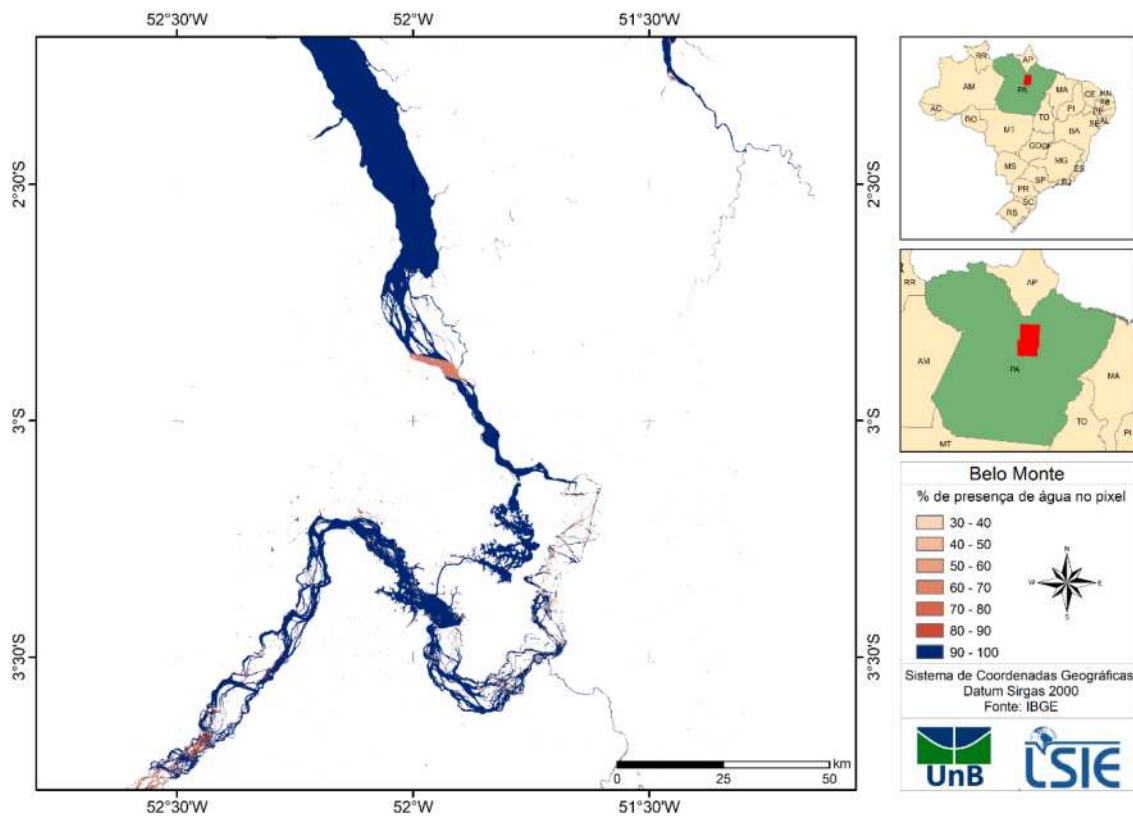


Figura 3.5 – Imagem da porcentagem de presença de água no pixel ao longo de 2016-2017 na região da Bacia do Xingu.

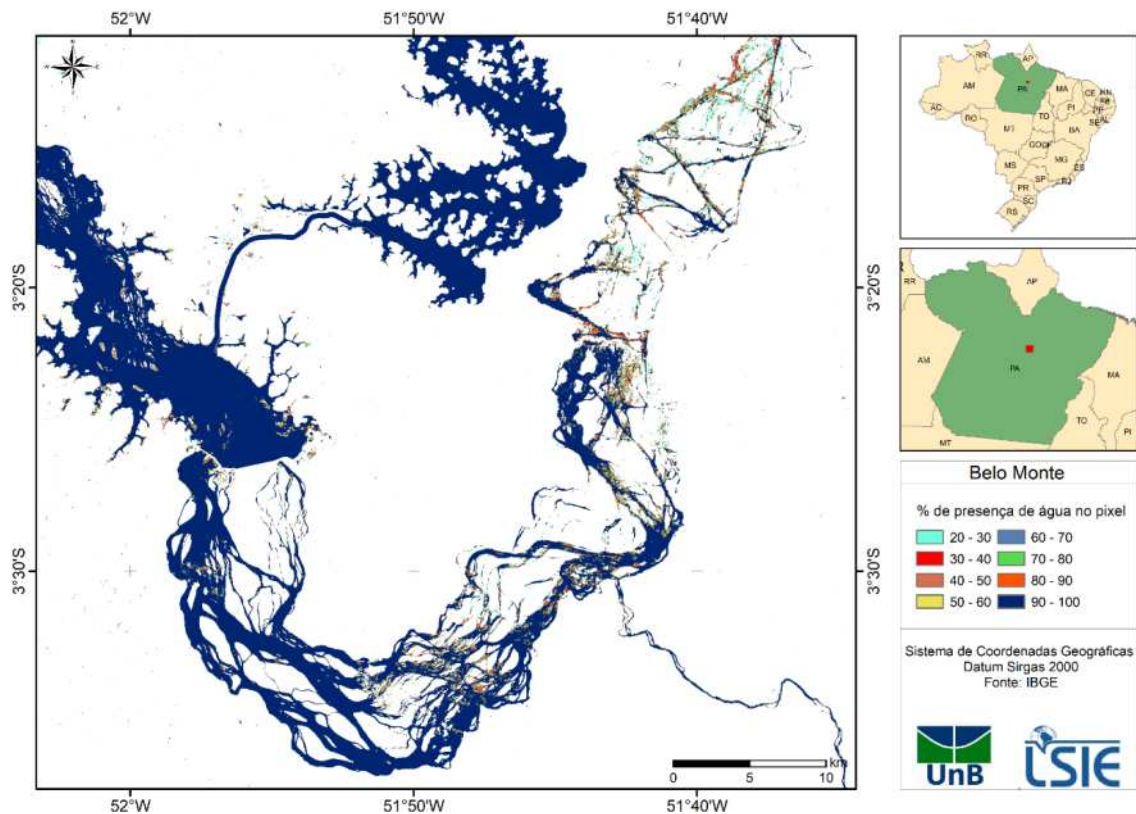


Figura 3.6 - Imagem em detalhe da porcentagem de presença de água no pixel ao longo de 2016-2017 na região da UHE de Belo Monte.

3.2. Bacia do rio São Francisco (Remanso)

A região do Médio São Francisco possui grande importância socioeconômica por seu multiuso, dotada de imenso potencial energético, hidroviário, agropecuário, agroindustrial, pesqueiro, turístico, social, cultural, histórico e ecológico. A população do Médio São Francisco corresponde a 20% da população total da bacia, sendo considerável desse total, o número da população urbana (ANA, 2005). A ocupação urbana, na maioria dos municípios na região, ocorreu de forma desordenada, sem considerar os aspectos ecológicos e de planejamento urbano e ambiental, a maioria dos municípios não possuem sistema de tratamento de esgoto (MMA, 2004).

As Figuras 3.7 e 3.8 demonstram a imagem de porcentagem de cobertura de água ao longo do período estudado na região próxima da barragem de Sobradinho. Observa-

se uma grande variação nas margens da represa de Sobradinho que passa por um intenso período de estiagem. A seca que atinge a região diminui a capacidade do maior reservatório do Rio São Francisco em apenas 5,9%. Esse evento climático afeta os agricultores, que nos perímetros públicos irrigados estão proibidos de ampliar a área de produção. As imagens permitem descrever a forte oscilação presente ao longo do ano com vários pixels com porcentagens variadas próximo as margens da represa.

A Figura 3.8 apresenta em melhor detalhe a imagem de porcentagem de cobertura de água, sendo possível evidenciar as mudanças do nível da água nas margens dos rios e nos lagos fluviais presentes na planície e associados a canais secundários e fechamento de meandros.

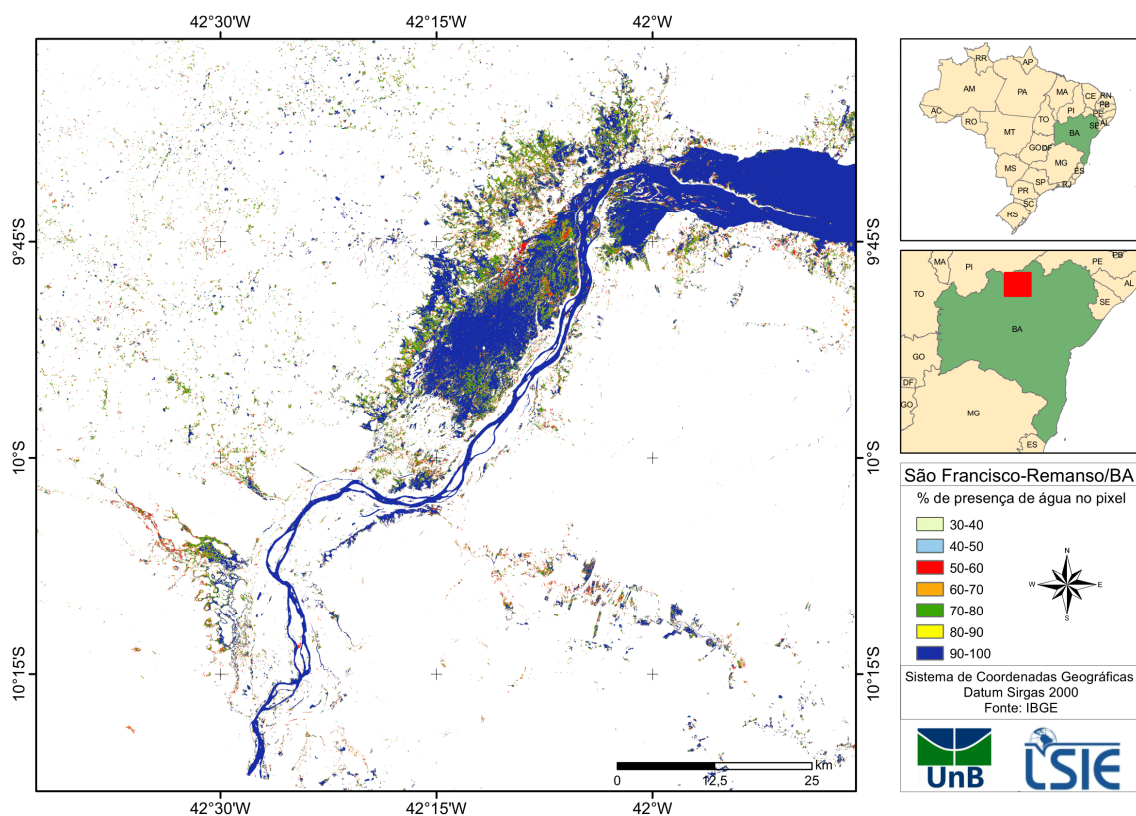


Figura 3.7 Imagem da porcentagem de presença de água no pixel ao longo de 2016-2017 na região de Remanso (BA) ao longo do rio São Francisco.

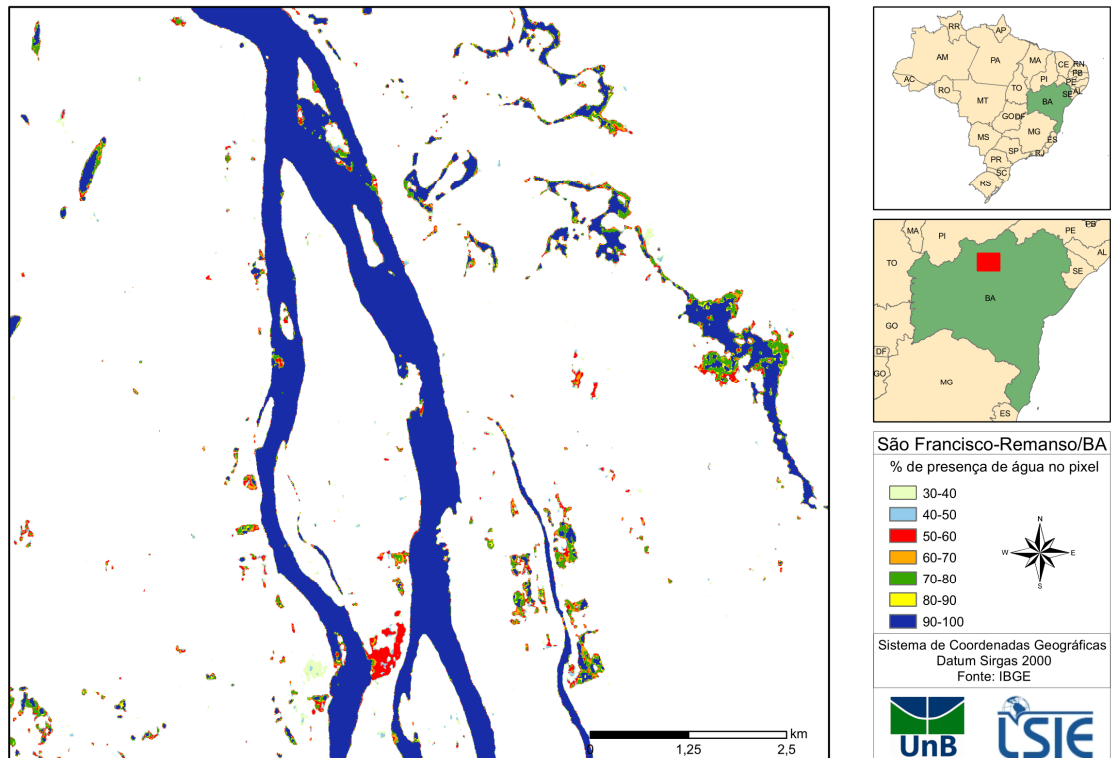


Figura 3.8 Imagem de detalhe da porcentagem de presença de água no pixel ao longo de 2016-2017 na região de Remanso (BA) ao longo do rio São Francisco.

Essa área difere das áreas de estudo na região Amazônica por não ter a intensidade de nuvens presentes. Assim, foi utilizado complementarmente as imagens do sensor Landsat 8 OLI para avaliar a dinâmica dos corpos hídricos. As imagens foram adquiridas entre os anos de 2003-2017, e sofreram correção atmosférica e ortorretificação. A delimitação dos corpos d'água adotou valores de NDVI negativos e os valores da banda QA que não foram afetados por problemas atmosféricos. Dentro do período foi separado as imagens de maior e menor área de água (**Figura 3.9**). A **Figura 3.10** apresenta a diferença entre o período mais cheio e seco no trecho do rio São Francisco na região de Pilão Arcado e Remanso (Bahia).

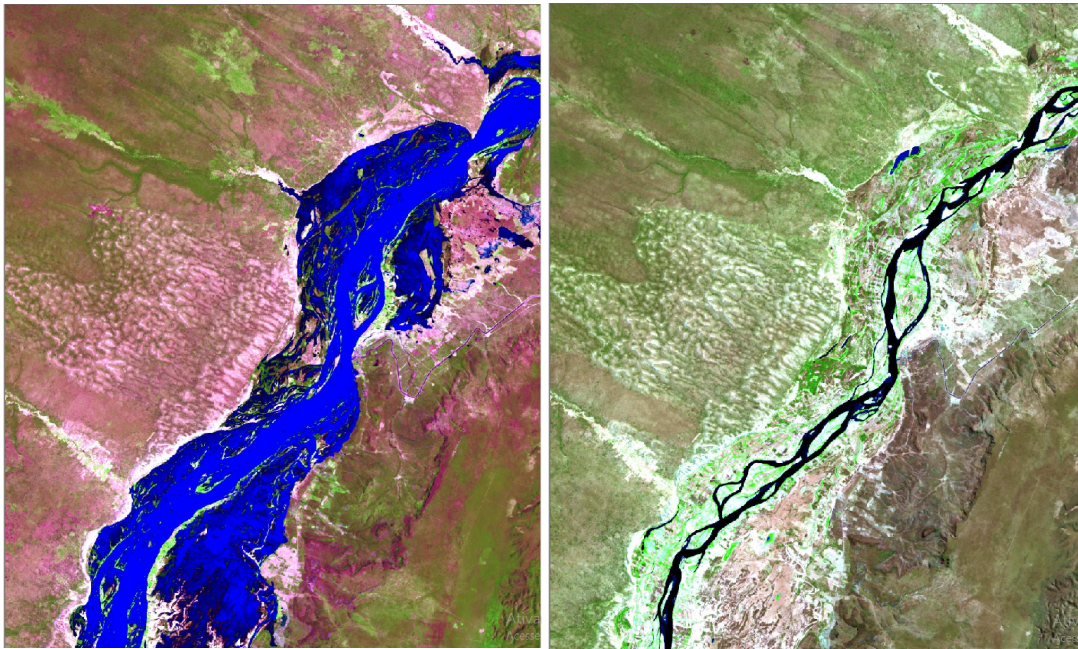


Figura 3.9 Imagens do sensor Landsat 8 OLI dos períodos mais cheio e seco entre 2002-2017.

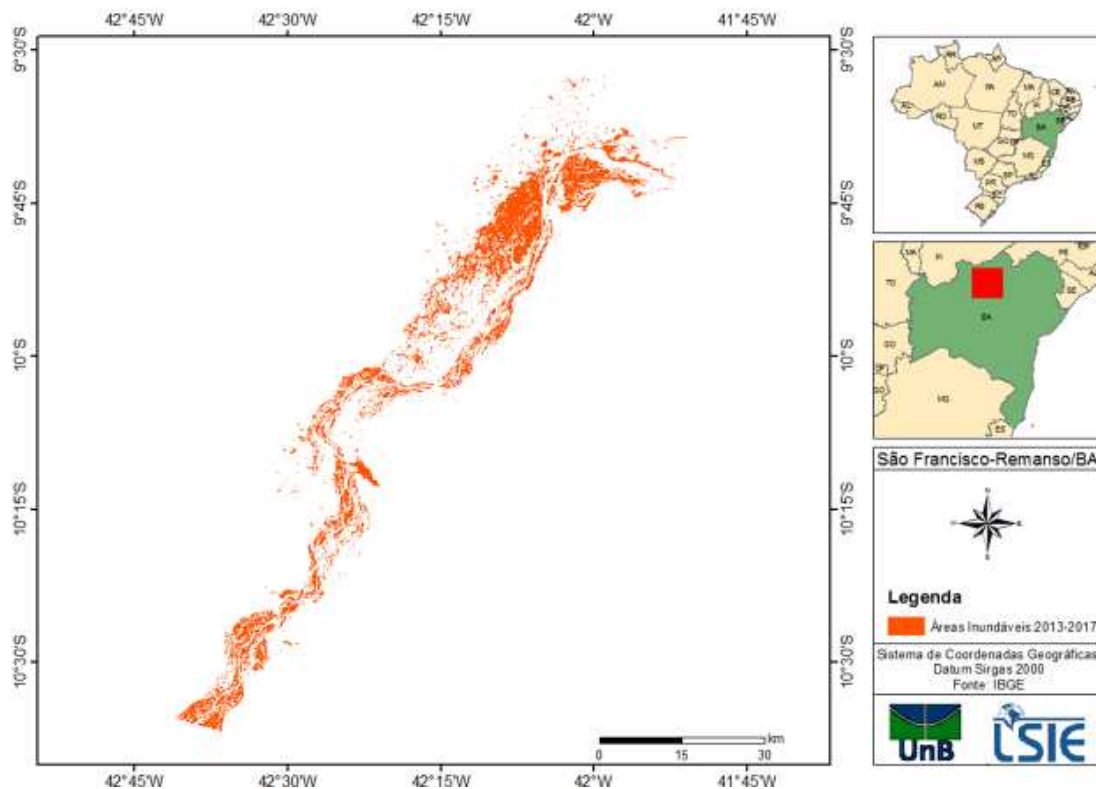


Figura 3.10 – Diferença da imagem entre a época mais cheia e seca no trecho do São Francisco na região de Remanso (BA).

3.3. São Francisco (Cabrobó)

O rio São Francisco na região do Cabrobó também apresenta um bom exemplo da dinâmica fluvial evidenciando na imagem de porcentagem de cobertura de água ao longo do período uma variação do nível de água afetando principalmente as ilhas fluviais e lagoas marginais (Figura 3.11). A **Figura 3.12** demonstra em uma área de detalhe a subtração entre a imagem com maior porcentagem de cobertura de água em relação a menor, evidenciando as mudanças nas lagoas marginais.

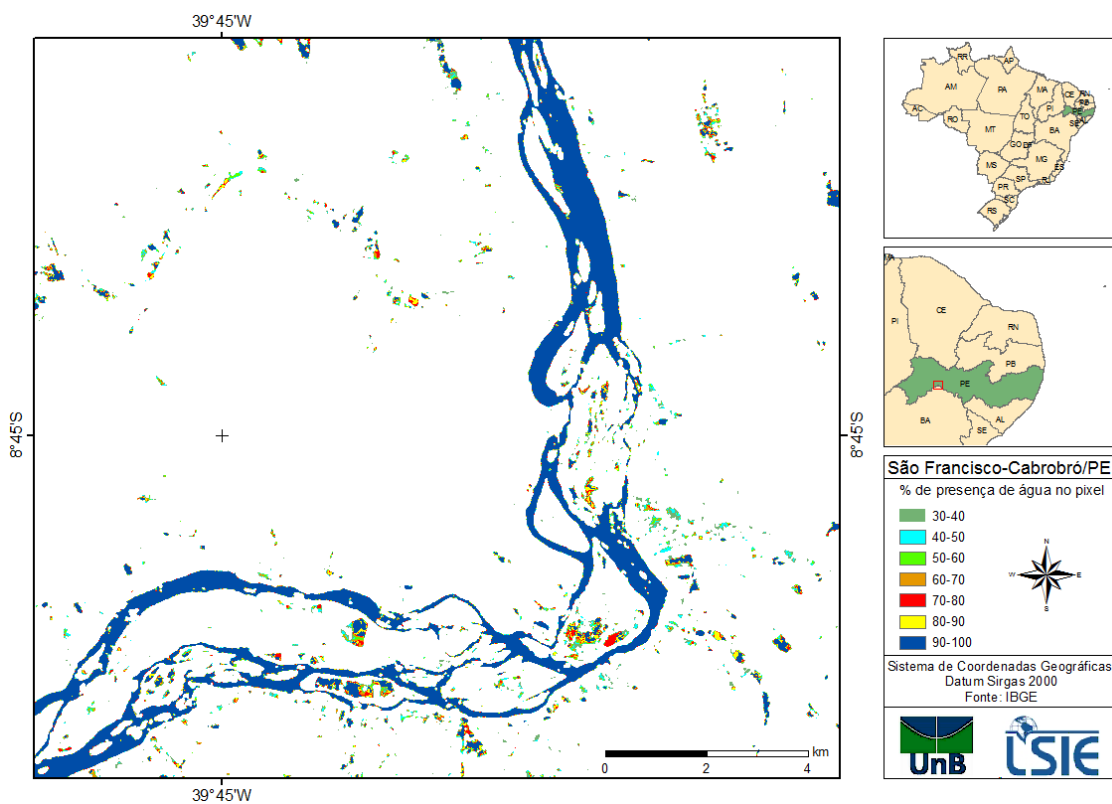


Figura 3.11 Imagem da porcentagem de presença de água no pixel ao longo de 2016-2017 na região de Remanso (BA) ao longo do rio São Francisco.

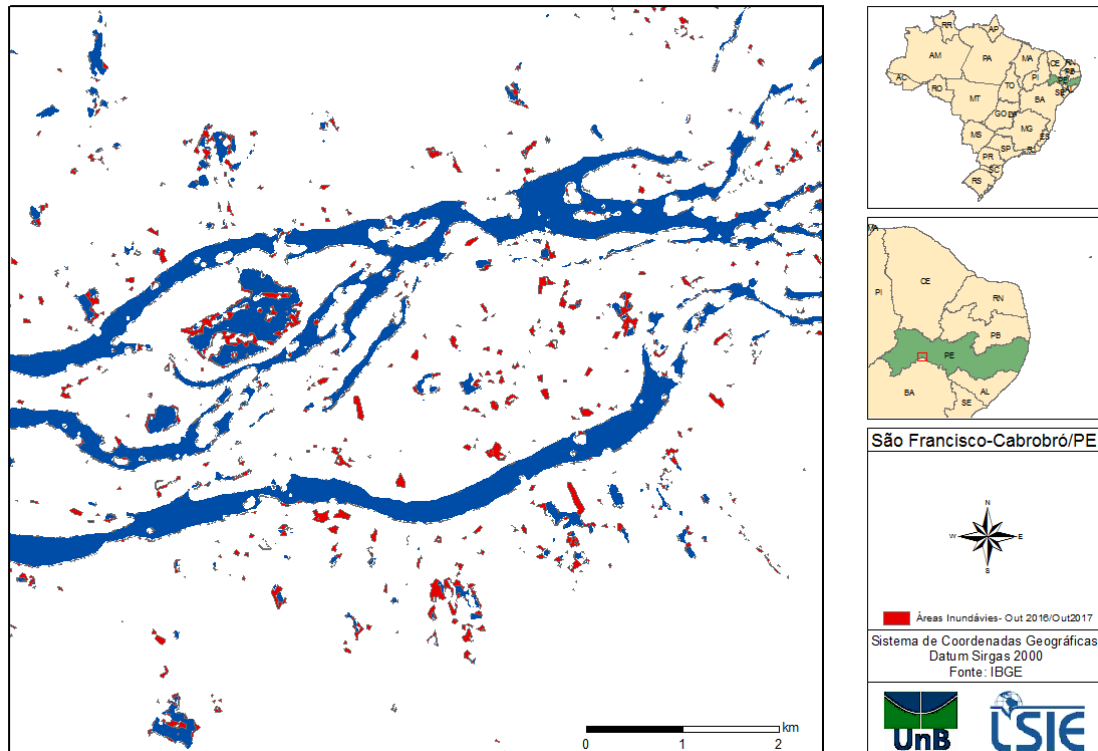


Figura 3.12 Imagem de subtração entre o período de enchente e seca na região de Cabrobó (PE) ao longo do rio São Francisco.

3.4. Rio Negro (Roraima)

A região do alto Rio Negro é uma macrorregião de Igapós e fica próxima ao Parque estadual Serra do Aracá, especificadamente na divisão da Amazônia com o estado de Roraima. Considerando o mapa de clima do IBGE a região possui duas classes: úmido e superunido. O rio Negro é de cunho federal, suas margens inundáveis, tanto as áreas de várzea quanto os Igapós, pertencem à União e não podem ser objeto de transação, empréstimo ou doação (BARBOSA et al., 2006). Com isso, seu uso e ocupação devem ser regularizados perante a lei por meio de concessão, hoje a cargo da Secretaria de Patrimônio da União (SPU) estipulado em 1944 pelo Decreto de Lei nº 6.871 como a responsável pelas áreas alagáveis. No alto do Rio Negro, próximo ao

Parque Estadual Serra do Aracá, existem as macrorregiões de Igapós, de extremo valor biológico e aquífero, que será mapeada e caracterizada ao longo do projeto.

A **Figura 3.13** evidencia as áreas de rios e as regiões de Campinaranas que são sujeitas a alagamento periódico consequente da flutuação do lençol freático. Esses ambientes de inundação ocorrem na bacia do alto Rio Negro e ao longo dos rios de água preta, que indicam a presença de ácidos húmicos e material turfoso inerte em suspensão. A região caracteriza-se com planícies inundáveis, solos arenosos mal drenados e oligotróficos e também grande quantidade de lagoas. Devido à grande pobreza dos solos e à alta precipitação, que contribui para a lixiviação, as espécies adaptadas a estes ambientes apresentam uma eficiente ciclagem de nutrientes.

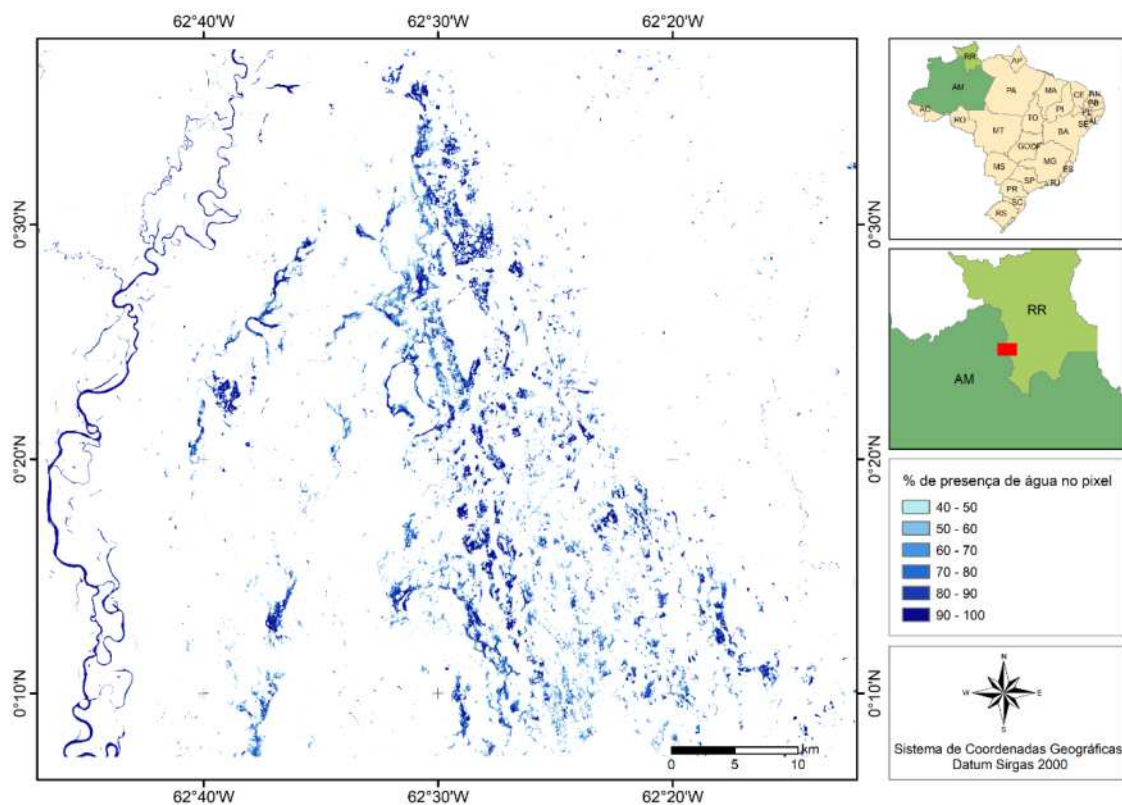


Figura 3.13 - Imagem da porcentagem de presença de água no pixel ao longo de 2016-2017 na região do Alto Rio Negro, evidenciando as regiões de Campinaranas.

3.5. Rio Negro (Anavilhanas)

O arquipélago de Anavilhanas estava inserido em uma Estação Ecológica criada pelo decreto nº 86.061, de 2 de junho de 1981. Em 2008 a lei nº 11.799 transforma a Estação Ecológica de Anavilhanas em Parque Nacional (**Figura 3.14**). O Parque encontra-se no domínio geomorfológico denominado de Planície Amazônica, cujas características mais perceptíveis são planícies de inundação e terraços pluviais muito amplos que ocorrem ao longo dos principais canais tronco da bacia hidrográfica dos rios Negro-Solimões-Amazonas. O padrão anastomosado do Rio Negro é resultante da sedimentação aluvial. Inúmeras formas deposicionais estão presentes no percurso do Rio Negro, entre elas, as ilhas fluviais. A **Figura 3.14** demonstra a imagem de porcentagem de cobertura de água ao longo do período estudado, evidenciando a dinâmica fluvial em um padrão anastomosado onde inúmeras ilhas fluviais apresentam variações.

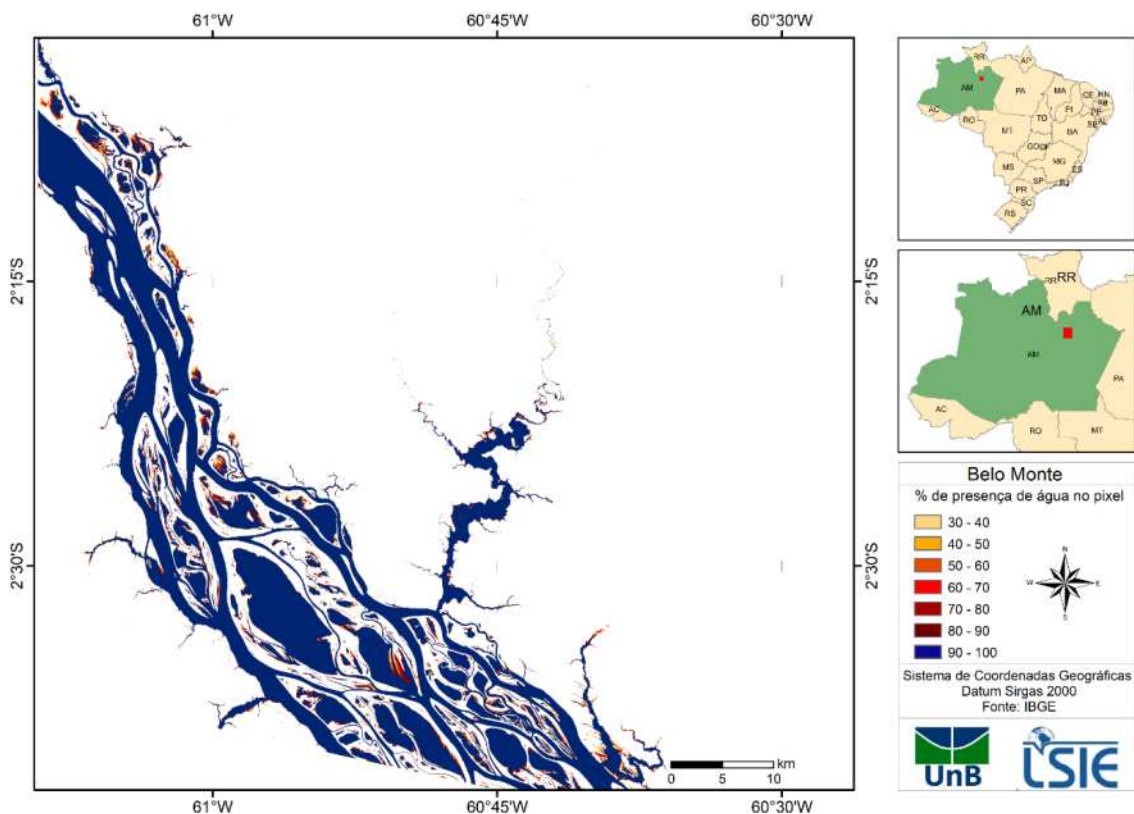


Figura 3.14. Imagem da porcentagem de presença de água no pixel ao longo de 2016-2017 na região de Anavilhanas ao longo do rio Negro.

3.6. Rio Juruá

A região do rio Juruá no Estado do Acre foi incluída como área de estudo por ter sido alvo de uma enchente histórica no início do ano de 2017 que fez com que os municípios de Cruzeiro do Sul, Rodriguez Alves e Mânico Lima decretassem situação de emergência. As inundações do rio Juruá provocaram transtornos com a invasão das cidades e rodovias intermunicipais. O rio Juruá atingiu 14,5 metros e inundou a cidade de Cruzeiro do Sul que teve que retirar 160 de famílias de suas casas.

A **Figura 3.15** apresenta em escala regional a imagem da porcentagem de cobertura de água ao longo do período estudado. A **Figura 3.16** demonstra um zoom em uma parte do rio que evidencia a expansão da área de água ao longo das margens fluviais e meandros abandonados.

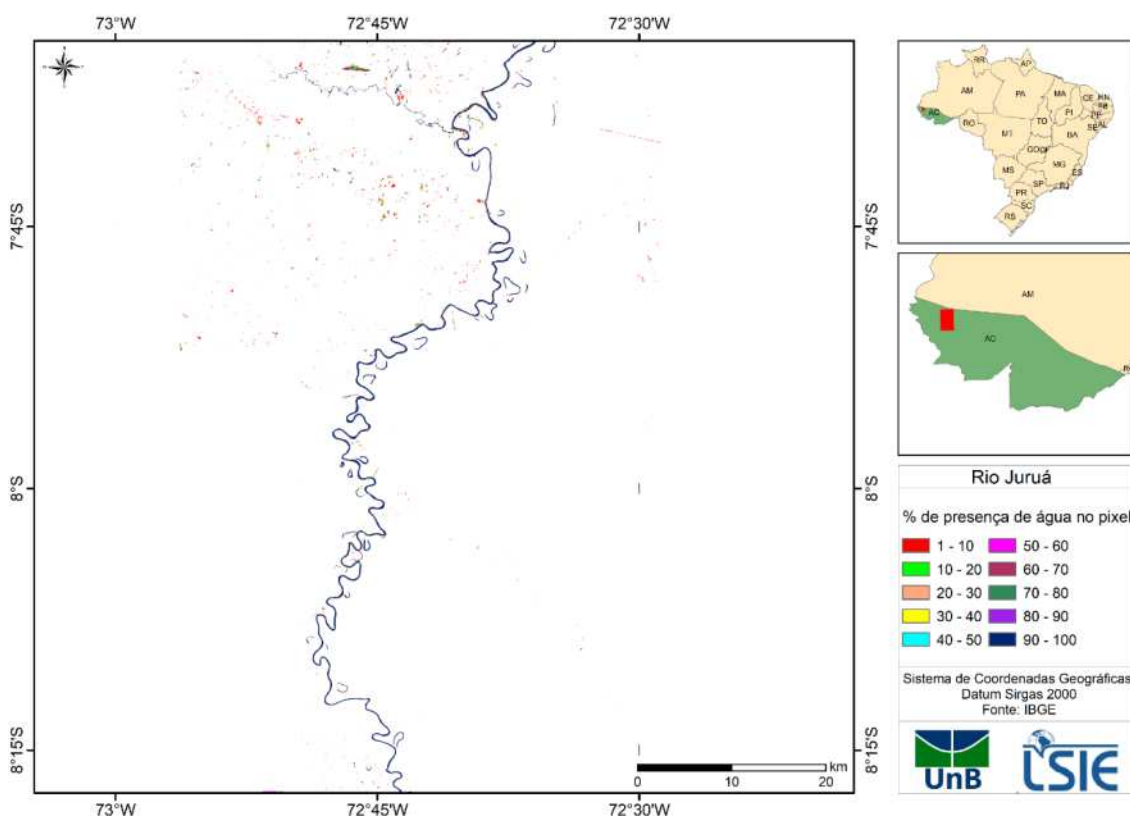


Figura 3.15. Imagem da porcentagem de presença de água no pixel ao longo de 2016-2017 na região de Anavilhanas ao longo do rio Negro.

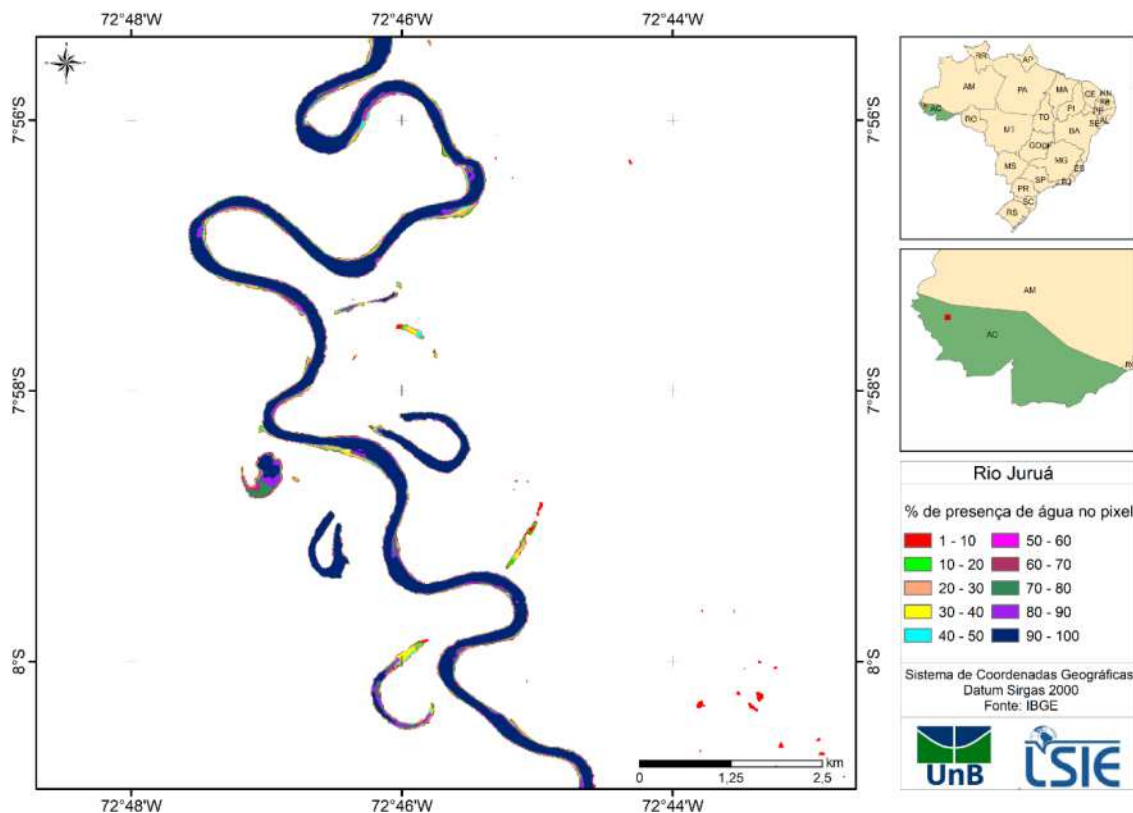


Figura 3.16. Imagem da porcentagem de presença de água no pixel ao longo de 2016-2017 na região de Anavilhanas ao longo do rio Negro.

3.7. Rio Branco (Roraima)

A porção sul do estado de Roraima está inserida no domínio Amazônico, onde se encontra o baixo curso do rio Branco, com cerca de 428 km de extensão até desaguar no rio Negro, que por fim deságua no rio Amazonas (**Figura 1**). O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo tropical equatorial chuvoso (Af), com estação seca pouco definida, elevado índice de precipitação anual, acima de 2000 mm, com pouca variação ao longo dos meses e anos. A variação de temperatura também é baixa, não chegando a ultrapassar 5°C dentro das médias mensais (RADAM 1975, BARBOSA 1997, BRASIL 2010a, BRASIL 2010b). É possível verificar períodos

que se encontram abaixo da média pluviométrica, sobretudo nos meses entre agosto e outubro. Esta porção do estado sofre forte influência da massa de ar equatorial (mEc), que provoca chuvas fartas em quase todo ano, por conta da presença de forte umidade e da condensação dessa massa de ar (BARBOSA 1997).

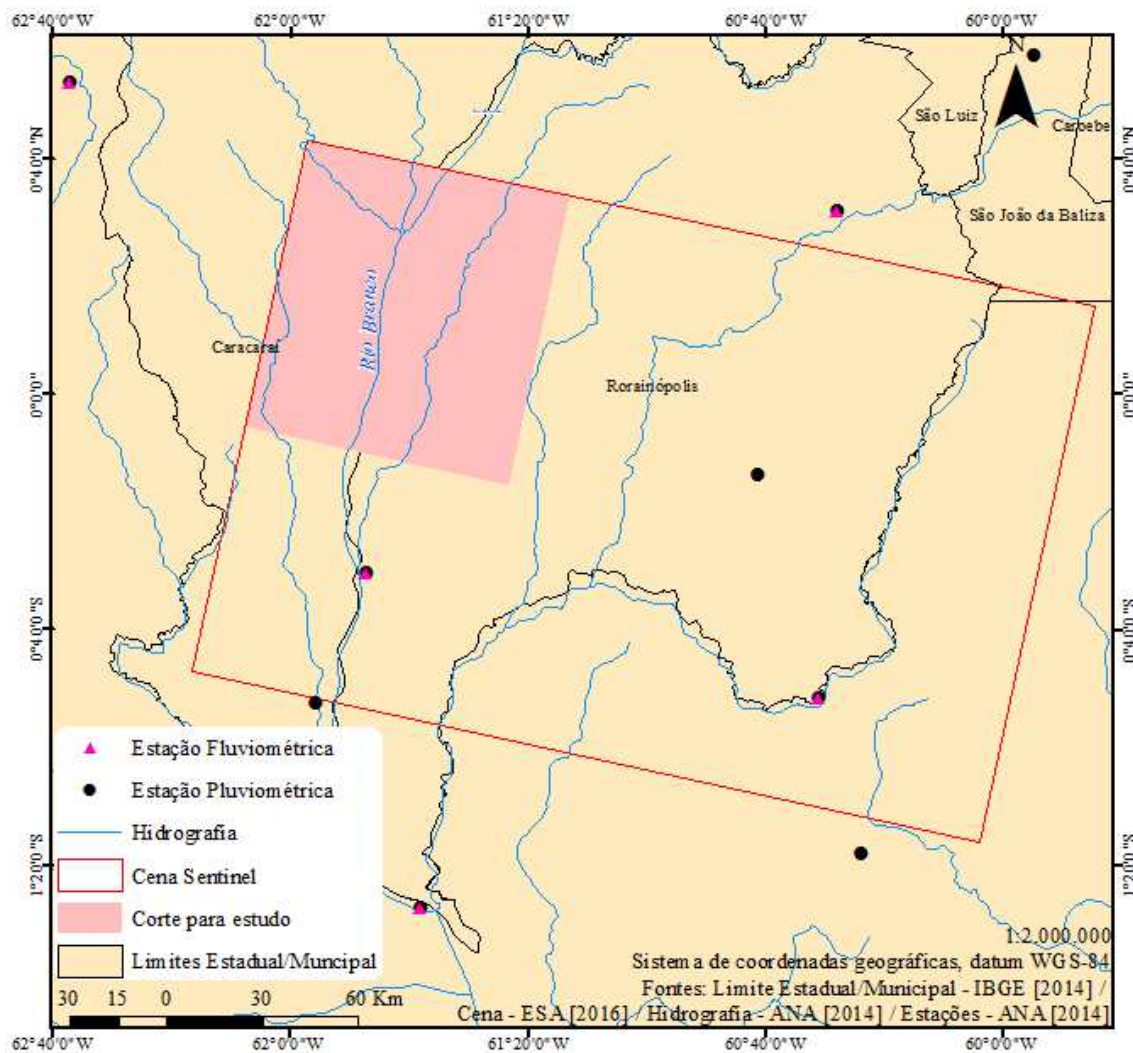


Figura 3.17. Localização da área de estudo da região do rio Branco.

A área se encontra sobre sedimentos aluvionares inconsolidados do período Quaternário, da Formação Içá. Com depósitos de cascalhos, areias quartzosas e argilas nos leitos e terraços dos principais cursos d'água, formando a Depressão do Rio Branco – Rio Negro (RADAM 1975). Tais sedimentos foram depositados em decorrência dos processos fluviais, em áreas de planícies de inundação (RADAM 1975). Por se

encontrar em uma região de depressão com rios majoritariamente de padrão meandrante, a porção sul de Roraima possui um grande número de áreas inundadas, permanentemente ou periodicamente, formando planícies alagáveis (RADAM 1975, CARVALHO 2015). Segundo o projeto RADAM 1975, as áreas de acumulação inundáveis representavam 106.000 km² de um total de 195.000 km² de área estudada pelo mesmo na depressão do Rio Branco – Rio Negro.

A vegetação da área de estudo se caracteriza pela presença de dois tipos principais, a Floresta Ombrófila Densa e as Campinaranas. As Campinaranas são basicamente planícies fluviais onde se encontram formações pioneiras de porte arbustivo médio-baixo (RADAM 1975, CARVALHO 2015). A Campinarana é considerada como a "caatinga amazônica", por ser uma mata baixa sobre um solo arenoso, sua localização em domínio amazônico está ligada ao elevado índice pluviométrico. Esta classe pode ser dividida em subgrupos de Campinaranas, são eles: a florestada, arborizada, arbustiva e a gramíneo-lenhosa (BRASIL 2010b).

A **Figura 3.16** demonstra as máscaras de cobertura de água ao longo do período estudado, evidenciando a dinâmica do nível de água ao longo do ano. A Figura 3.17 representa numericamente a variação das áreas das máscaras, estando coerente com o padrão e ciclo fluviométrico da região em estudo.

A diferença entra os períodos de maior cheia e vazante do rio, evidenciando a intensa variação do nível de água principalmente nas regiões cobertas por Campinaranas que sofrem inundações sazonais (**Figura 3.18**).

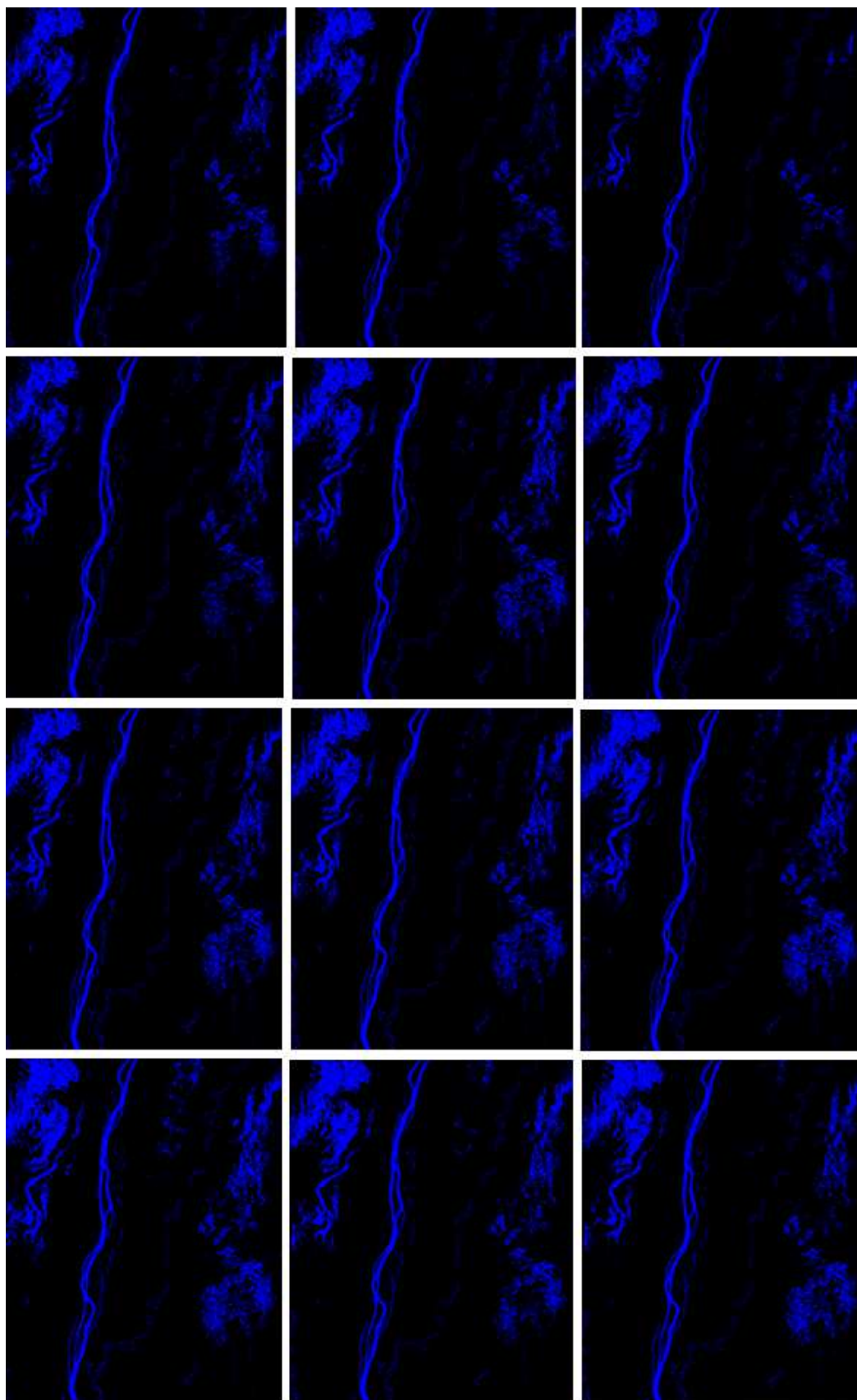


Figura 3.16 - Sucessão temporal das máscaras dos corpos d'água ao longo de outubro de 2016 até outubro de 2017.

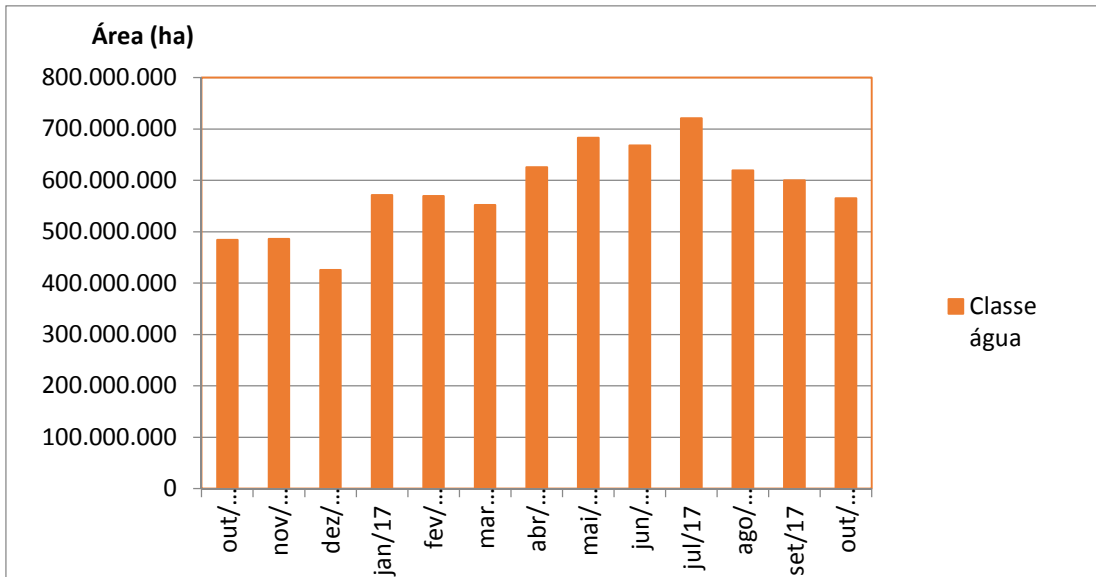


Figura 3.17 - Área com cobertura de água na região do rio Branco (RR).

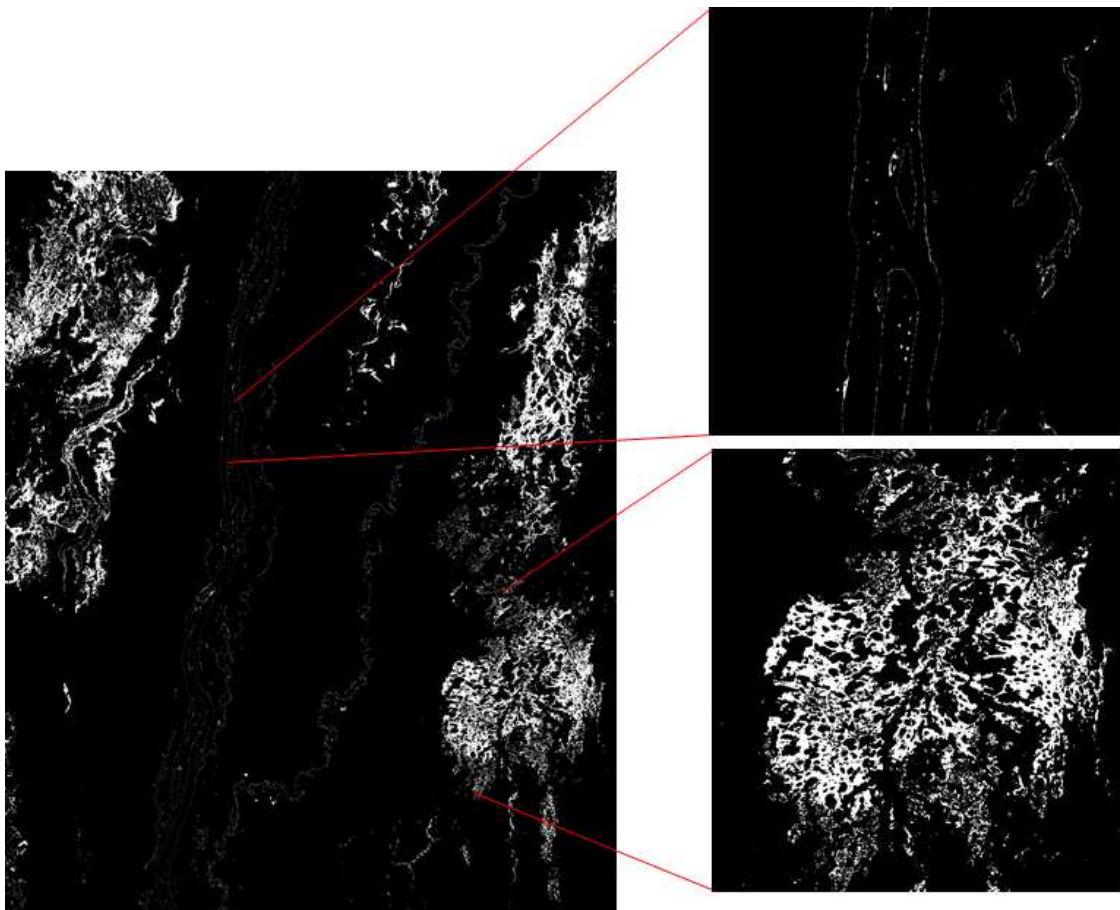


Figura 3.18 – Imagem da diferença entre a imagem com maior e menor extensão de cobertura de água na região das Campinaranas de Roraima.

3.8. Rio Amazonas (região de Parintins)

A área de estudo na região de Parintins totaliza aproximadamente 49.000 km² e está compreendida entre as coordenadas 02° 23' e 05° 40' de latitude sul e 46° 22' e 49° 03' de longitude oeste, sendo coberta por cinco cenas do sensor “Thematic Mapper” (TM) do satélite Landsat. O clima é do tipo "Am" na classificação de Köppen (RADAM, 1978), com precipitação anual de 1.355 a 2.839 mm. A temperatura média oscila de 25,6 a 27,6 °C, com umidade relativa do ar variando de 84 a 90% ao longo do ano; os meses mais chuvosos vão de dezembro a maio, e os mais secos de agosto a novembro. A área de estudo localiza-se entre os municípios de Itaitiaia, Urucará e Parintins a leste de Manaus, no estado da Amazônia. A área em análise compreende um trecho do rio Amazonas situado no quadrante com as seguintes coordenadas geográficas 22° 30' 48,84'' S 44° 43' 25,94'' W e 22° 37' 59,16'' S 44° 31' 35,68'' W projeção UTM (Universal Transverse Mercator), Zona 21 Sul, sistema de referência SIRGAS 2000. (**Figura 3.19**). As imagens referentes ao período de maior e menor cobertura de água demonstra a intensa dinâmica fluvial sazonal na região (**Figuras 3.20, 3.21 e 3.22**).

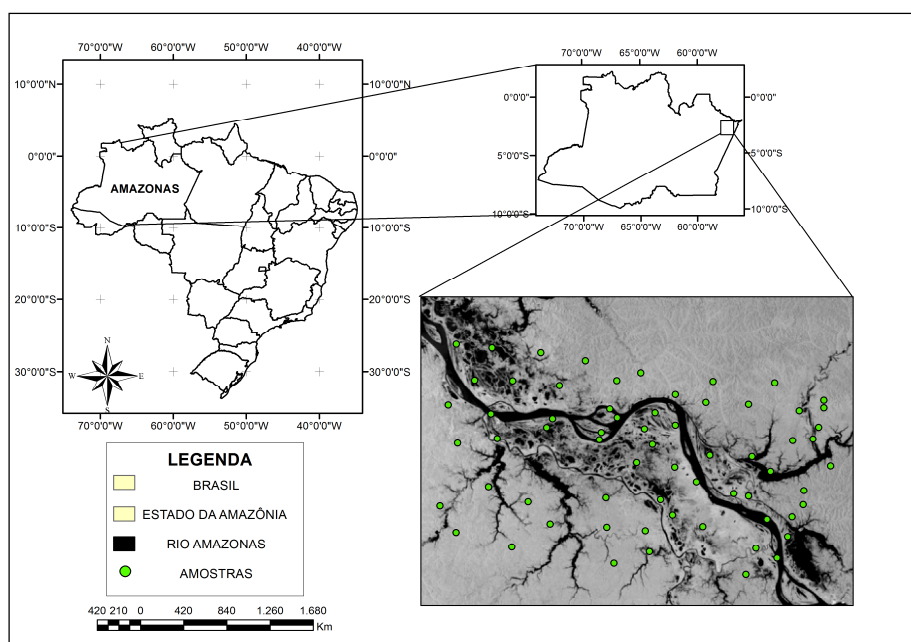


Figura 3.19 - Localização da área de estudo na Amazônia Central obtida por meio da imagem do Radar Sentinel1 – SAR em 26 de setembro de 2016.



Figura 3.20 - Mapa de maior área inundada, 06 de julho de 2017.

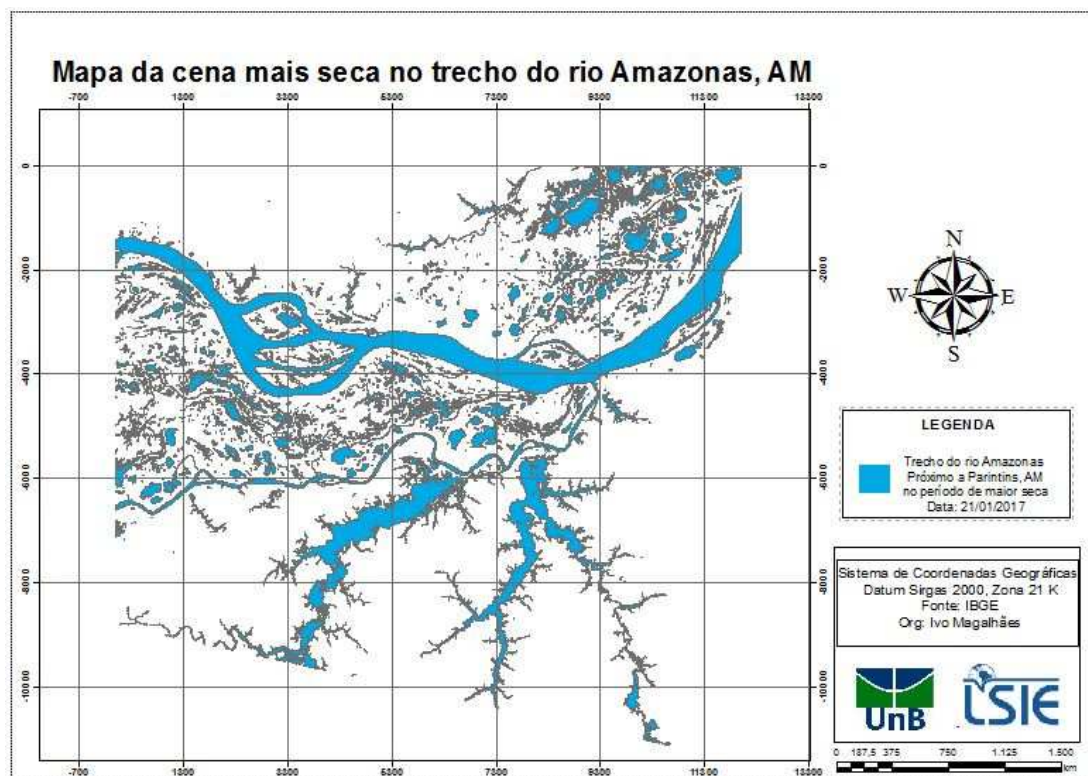


Figura 3.21 - Mapa de menor cobertura de água (23 de dezembro de 2016).

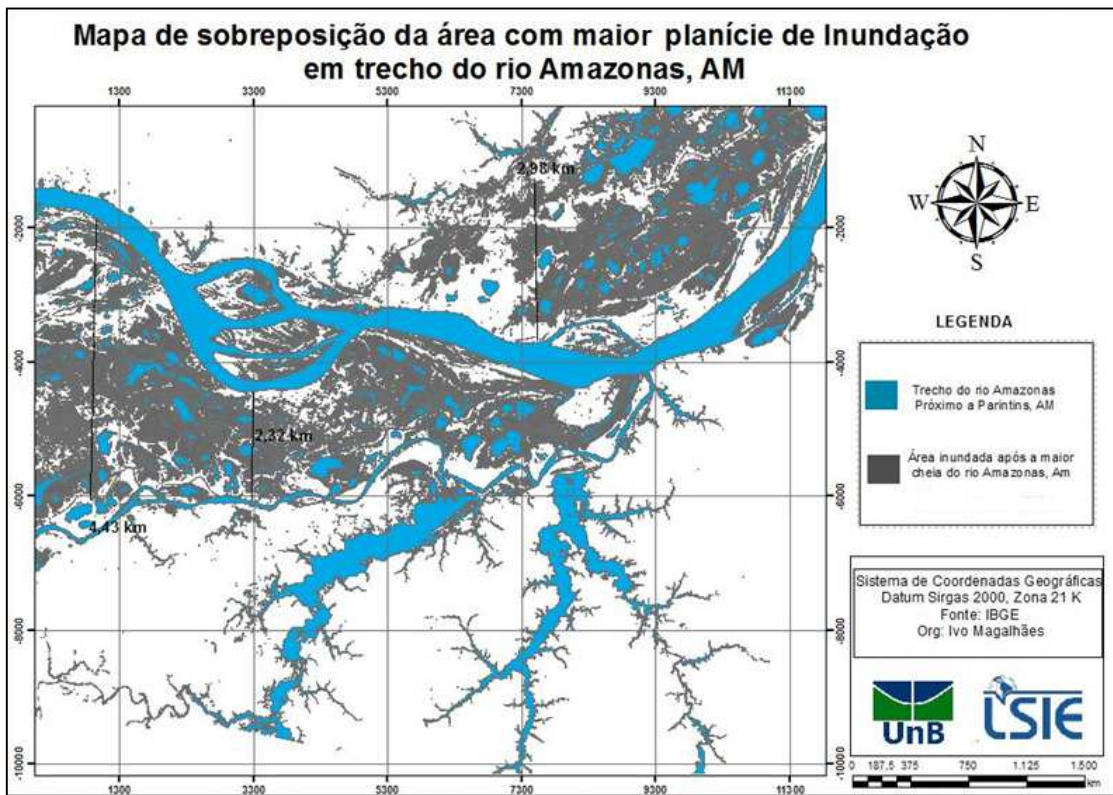


Figura 3.22 – Comparação entre a área inundada e da parte constantemente coberta por água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, R. I. Distribuição das chuvas em Roraima. Homem. In: ambiente e ecologia no Estado de Roraima. Manaus: INPA, 325-335. 1997.

BRASIL, MDA Plano territorial de desenvolvimento rural sustentável: propostas de políticas públicas para o território sul de Roraima. Rorainópolis/RR: MDA, 2010a.

BRASIL, MME. Bacia Hidrográfica do Rio Branco/RR: Estudos de Inventário Hidrelétrico. Tomo 1/4. MME, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Brasília, DF, Brasil. 275 p. 2010b.

CARVALHO, T. M. SÍNTESE DOS ASPECTOS HIDROGEOMORFOLÓGICOS DO ESTADO DE RORAIMA, BRASIL. In: Contribuições à Geologia da Amazônia (Orgs. Gorayeb, P.; Meiguins, A.). Edição Volume 9 (9CGA), Ed. SBG-Norte. p.435-450. 2015.

ENGDAHL, M., MINCHELLA, A., MARINKOVIC, P., VECI, L., & LU, J. (2012). Nest: An esa open source toolbox for scientific exploitation of SAR data. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International (pp. 5322-5324). IEEE.

MAHAPATRA, P. & HANSSSEN R. (2011) Next ESA SAR Toolbox (NEST) In: TIGER Capacity Building Facility II Training Course on Active and Passive Microwave Remote Sensing, 20 – 24 June 2011, Delft, The Netherlands. Disponível em: https://earth.esa.int/documents/507513/1077921/2011_Tiger_NEST_cookbook.pdf/da84f918-a9e4-4404-8515-b624b7a6210c. Acesso em: 10/11/2017.

MANFREDI, M., GRANA, C., & PELLACANI, G. Skin Surface Reconstruction and 3D Vessels Segmentation in Speckle Variance Optical Coherence Tomography. In: VISIGRAPP (4: VISAPP). 2016. p. 234-240.

RADAMBRASIL, Projeto. Folhas NA. 20. Boa Vista e parte das Folhas NA 21 Tumucumaque, NB 20 Roraima e NB 21; Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 428p. 1975.

VECI, L. (2016). SENTINEL-1 Toolbox - SAR Basics Tutorial. Array Systems Computing INC. / ESA. Disponível em:

<http://sentinel1.s3.amazonaws.com/docs/S1TBX%20SAR%20Basics%20Tutorial.pdf>.

Acesso em: 10/11/2017.