



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JULIO DE MESQUITA FILHO”**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS**



Trabalho de Graduação

Curso de Graduação em Geografia

**INFLUÊNCIA DA HIDROGEOMORFOLOGIA SOBRE A DINÂMICA DA PAISAGEM  
EM UMA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO AMAZÔNICA: UMA ABORDAGEM POR  
SENSORIAMENTO REMOTO**

**Julio de Araújo Alves**

**Prof. Dr. Thiago Sanna Freire Silva (orientador)**

Rio Claro (SP)

2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus de Rio Claro

JULIO DE ARAÚJO ALVES

INFLUÊNCIA DA HIDROGEOMORFOLOGIA SOBRE A  
DINÂMICA DA PAISAGEM EM UMA PLANÍCIE DE  
INUNDAÇÃO AMAZÔNICA: UMA ABORDAGEM POR  
SENSORIAMENTO REMOTO

Trabalho de Graduação apresentado ao  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -  
Câmpus de Rio Claro, da Universidade  
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,  
para obtenção do grau de Bacharel em  
Geografia.

Rio Claro - SP

2016

551.42 Alves, Julio de Araújo  
A474i      Influência da hidrogeomorfologia sobre a dinâmica da  
paisagem em uma planície de inundação amazônica: uma  
abordagem por sensoriamento remoto / Julio de Araújo Alves.  
- Rio Claro, 2016  
36 f. : il., figs., gráfs., mapas

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Geografia)  
- Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e  
Ciências Exatas  
Orientador: Thiago Sanna Freire Silva

1. Geomorfologia. 2. Várzea amazônica. 3. Radar de  
abertura sintética. 4. Áreas úmidas. 5. Amazônia. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP  
Campus de Rio Claro/SP

JULIO DE ARAÚJO ALVES

INFLUÊNCIA DA HIDROGEOMORFOLOGIA SOBRE A DINÂMICA  
DA PAISAGEM EM UMA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO  
AMAZÔNICA: UMA ABORDAGEM POR SENSORIAMENTO  
REMOTO

Trabalho de Graduação apresentado ao  
Instituto de Geociências e Ciências  
Exatas - Câmpus de Rio Claro, da  
Universidade Estadual Paulista Júlio de  
Mesquita Filho, para obtenção do grau de  
Bacharel em Geografia.

Comissão Examinadora

\_\_\_\_\_ (orientador)

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Rio Claro, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Thiago Silva, pela paciência e pela oportunidade de trabalhar ao seu lado e compartilhar sua visão apaixonada sobre a ciência.

Agradeço a meus pais, Geraldo e Luciene, pelo amor, confiança e apoio financeiro. A meu irmão, Raul, pelos momentos de descontração e música para relaxar.

Agradeço a Elisa, minha companheira. Sem você do meu lado, muita coisa ainda estaria por fazer. Pelos dias de tranquilidade e pelas broncas.

Agradeço aos amigos que me acompanharam nesses anos de universidade. Correndo o risco que cometer uma injustiça ou esquecimento: aos meus amigos de sempre, Guilherme, Luiz Flávio e Rafael; aos amigos da Caroço e adjacentes: Rodrigo, Poeta, Bruce e Beig; aos Chico Fumaça e adjacentes: Replay, Xeldo, Vitão, Vinão, Miagui e Maradona.

Agradeço aos amigos de laboratório, especialmente Annia e Luiz, pela paciência, dados e por tudo sobre radares;

Agradeço ao CNPq, pelo apoio financeiro durante os anos de iniciação científica.

## RESUMO

A calha do Rio Solimões-Amazonas e seus afluentes abriga a maior extensão contínua de florestas tropicais do mundo. O relevo relativamente plano propiciou a gênese de imensas planícies de inundação ao longo da calha fluvial, onde vive mais de 75% da população humana da região. A inundação periódica das planícies é fruto do fluxo de entrada de água no sistema através da precipitação, escoamento pelas vertentes adjacentes, inundação das drenagens tributárias e estoque subterrâneo. Assim, planícies de inundação geomorfológica- e hidrologicamente distintas apresentam variações na composição da paisagem, e diferentes períodos de duração da inundação. O presente estudo (1) investigou, através de uma série histórica de imagens SAR de banda L, a dinâmica do pulso de inundação ao longo da planície alagável do sistema Manaquiri-Janauacá, Amazônia Central; e (2) mapeou os canais de drenagem da planície de inundação, buscando compreender a importância da hidrogeomorfologia sobre o fluxo da água e sobre a extensão e duração da inundação nessas áreas, e na consequente conectividade entre os habitats. O mapeamento da inundação e das drenagens permitiu a análise interpretativa da dinâmica hidrológica na paisagem da planície, propiciando o estabelecimento de diferentes unidades hidrológicas e a conectividade entre elas.

Palavras-chave: áreas úmidas, planície de inundação, hidrogeomorfologia, radar de abertura sintética

## ABSTRACT

The Solimões-Amazonas River and its tributaries hold the largest rainforest of the world. The relatively flat relief led to the genesis of vast floodplains along the river channel, where more than 75% of the human population in the region lives. The periodic flooding of these plains is the result of water inflow to the system through precipitation, runoff from adjacent slopes, flooding of tributaries and underground water. Thus, geomorphologically and hydrologically distinct floodplains have variations on landscape patterns, and different periods and duration of flooding. This study (1) investigated through a historical series of L-band SAR images, the dynamics of the floodpulse along the floodplain of the Manaquiri-Janauacá system, Central Amazon; and (2) mapped the floodplain channels, trying to understand the importance of hydrogeomorphology on waterflow and the extent and duration of flooding in these areas, and connectivity between habitats. The mapping of flood and drainages allowed the interpretative analysis of landscape dynamics in the floodplain, causing the establishment of different hydrological units and the connectivity between them.

Keywords: wetlands, floodplain, hydrogeomorphology, synthetic aperture radar

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....                       | 8  |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA                  |    |
| 2.1. Áreas úmidas amazônicas .....        | 11 |
| 2.2. Sensoriamento remoto por radar ..... | 12 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS                    |    |
| 3.1. Área de estudo .....                 | 14 |
| 3.2. Dados de sensoriamento remoto .....  | 17 |
| 3.3. Processamento dos dados .....        | 19 |
| 3.4. Análise dos dados .....              | 19 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....            | 24 |
| 5. CONCLUSÕES .....                       | 29 |
| 6. REFERÊNCIAS .....                      | 30 |

## 1. INTRODUÇÃO

A calha do Rio Solimões-Amazonas e seus afluentes abriga a maior extensão contínua de florestas tropicais do mundo, as quais ocupam cerca de 78% dos 7 milhões de km<sup>2</sup> da bacia amazônica (GOULDING et al., 2003). Apesar da preponderância de florestas de terra firme, a Amazônia também é conhecida por sua ampla rede hidrográfica, alimentada pela precipitação que alcança a média de 3500 mm/ano, com extremos anuais iguais ou superiores a 4500 mm/ano (FISCH et al., 1998; SATYAMURTY et al., 2010). Toda a bacia tem uma vazão média de 209 mil m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (LATRUBESSE et al., 2005), enquanto as superfícies de água chegam a recobrir 3% de toda a área central amazônica (ARRAUT et al., 2013). Cerca de 800.000 km<sup>2</sup> da bacia ocorrem em altitudes inferiores a 500m (MELACK e HESS, 2010), propiciando a ocorrência de imensas planícies de inundação ao longo da calha fluvial, cobertas por florestas sazonalmente inundadas, formações arbustivas e campos (JUNK, 1997; JUNK et al., 2012).

Planícies de inundação são áreas úmidas que oscilam periodicamente entre uma fase terrestre e uma fase aquática (JUNK, 1997). Essas áreas são responsáveis pelo fornecimento de uma série de serviços ecossistêmicos para a sociedade, enquanto, concomitantemente, se mostram como sistemas ecológicos de equilíbrio delicado (TURNER, 1991). As áreas úmidas participam na regulação climática e purificação e armazenamento de águas, oferecem habitat para diversas espécies, participam na retenção de sedimentos e recarga de águas subterrâneas, e proveem alimento, água e moradia para comunidades tradicionais (JUNK et al., 2014). Mais do que isso, as áreas úmidas têm função crucial na manutenção da biodiversidade, servindo de núcleo de reprodução de diversas espécies e participando ativamente do ciclo de carbono (JUNK et al., 2014). Além disso, as áreas úmidas da bacia amazônica concentram mais de 75% da população humana da região, que sobrevive a partir dos recursos extraídos desse ambiente (MELACK et al., 2004).

Os padrões espaciais e temporais da transferência de água, sedimentos e nutrientes nas planícies de inundação amazônicas estão intimamente ligados a aspectos geológicos, geomorfológicos e biogeoquímicos da bacia do Rio Amazonas (FORSBERG et al., 1988; RICHEY et al., 1989). A inundação periódica das planícies é fruto do fluxo de entrada de água no sistema através da precipitação, escoamento pelas vertentes adjacentes, inundação das drenagens tributárias e estoque subterrâneo (RICHEY et al., 1989). Sendo assim, planícies de inundação geomorfológica- e hidrológicamente distintas apresentam variações na composição da paisagem, e diferentes períodos de duração da inundação (WORBES et al., 1992; KALLIOLA et al., 1991).

Estudos climáticos mostram que a dinâmica do pulso de inundação na Amazônia poderá mudar nos próximos anos, principalmente pela intensificação da ocorrência de secas extremas (GLOOR et al., 2013). Projeções de cenários de mudanças climáticas e de cobertura da terra sugerem uma diminuição da vazão dos canais fluviais amazônicos, por conta do aumento na erosão superficial, na instabilidade e no assoreamento de taludes, fatores intimamente relacionados ao crescente desmatamento (COE et al., 2009). Amplitudes mais extremas do pulso de inundação na bacia amazônica poderão impactar significativamente o estabelecimento e crescimento de diversos tipos vegetacionais, a ciclagem do carbono e, conseqüentemente, a dinâmica das várzeas e toda a biodiversidade a elas associada (PIEPALE et al., 2013).

O monitoramento do pulso de inundação na várzea é prejudicado pelo difícil acesso às regiões em campo, e pela esparsa rede de estações fluviométricas ao longo da bacia Amazônica. Dessa maneira, o sensoriamento remoto é uma ferramenta importante para a caracterização e monitoramento destes ambientes (ARRAUT et al., 2013). A floresta amazônica é caracterizada pela intensa cobertura de nuvens, principalmente entre os meses de novembro a março, dificultando a extração de informações de imagens obtidas por meio de sensores óticos, o que representa um grande obstáculo para o monitoramento contínuo dessa região através de sensores passivos (ASNER, 2001). Sensores de micro-ondas, entre os quais se incluem os radares de abertura sintética (synthetic aperture radars – SAR) e, mais especificamente, o sistema ALOS/PALSAR (Advanced Land Observation Satellite/Phased Array

type L-band Synthetic Aperture Radar), possuem a capacidade de obtenção de informações sob diferentes condições de tempo e visibilidade. Em oposição aos sistemas passivos, radares são sistemas ativos, ou seja, não dependem da reflexão da luz solar e pouco são dependentes das condições da atmosfera. Assim, radares imageadores têm se mostrado uma ferramenta eficiente para caracterização e monitoramento de áreas úmidas, detectando, dentre outras informações, a extensão de superfícies aquáticas, e a variação na cobertura vegetal e estrutura do dossel (ROSENQVIST et al., 2003).

O conhecimento acerca dos processos geocológicos que permeiam as várzeas amazônicas mostra-se essencial, entendendo-se que essas paisagens contribuem fundamentalmente para a continuidade e manutenção dos sistemas ecológicos e ciclos biogeoquímicos, e para conservação do meio de vida da comunidade humana fixada na Amazônia. Compreender a sua dinâmica hidrológica e hidrogeomorfológica servirá de base para avanços em relação a compreensão da maior floresta contínua do planeta, sua biodiversidade e importância. Portanto, o presente estudo (1) investigou, através de uma série histórica de imagens SAR de banda L, a dinâmica do pulso de inundação ao longo da planície alagável do sistema Manaquiri-Janauacá, Amazônia Central; e (2) mapeou os canais de drenagem da planície de inundação, buscando compreender a importância da hidrogeomorfologia sobre o fluxo da água e sobre a extensão e duração da inundação nessas áreas, e na consequente conectividade entre os habitats.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Áreas úmidas amazônicas

Áreas úmidas são aquelas inundadas periodicamente, seja por precipitação direta, afloramento do lençol freático e, mais comumente, pelo transbordamento de rios e lagos, onde a biota responde ao controle do ambiente físico-químico exercido pela inundação através de adaptações morfológicas, fisiológicas e anatômicas, produzindo estruturas específicas dessas comunidades (JUNK et al., 1989). Essas áreas são controladas pelo “pulso de inundação” (JUNK et al., 1989), fenômeno no qual a precipitação sazonal nos Andes e na bacia amazônica gera um influxo anual de água, percorrendo e inundando as planícies do Rio Amazonas e seus tributários.

Os ambientes úmidos da Amazônia podem ser classificados quanto ao tipo de água que compõe o seu sistema. De maneira geral, existem três tipos de água na planície de inundação amazônica (JUNK, 1997): (i) a “água branca”, de origem andina, marcada pela alta concentração de material particulado em suspensão, pH neutro a básico e alto teor nutricional; responsável pela formação das “várzeas”; (ii) a “água preta”, oriunda da drenagem do Escudo das Guianas, ricas em matéria orgânica, tendência ao pH ácido e baixo teor de nutrientes; sua presença configura a formação dos “igapós”; e (iii) a “água clara”, originária do Cerrado brasileiro, com baixa concentração de sólidos suspensos, pH instável e ácido e quantidade bastante variável de nutrientes.

A calha do Solimões-Amazonas é classificada, partindo de estudos de Sioli (1956), como drenagem fluvial de água branca (JUNK et al., 2011). Esse tipo de drenagem carrega como característica a deposição de sedimentos nas suas planícies de inundação, as várzeas, e nas planícies de inundação dos sistemas lacustres que povoam suas margens, como o Manaquiri-Janauacá, tornando essas regiões férteis e possibilitando a ocorrência de comunidades vegetais altamente produtivas (JUNK et al., 2011). Em relação ao pulso de

inundação (JUNK, 1997), a área apresenta regime anual, monomodal, previsível e de grande amplitude (JUNK et al., 2014).

## 2.2. Sensoriamento remoto por radar

Os radares de abertura sintética (synthetic aperture radar – SAR) são sensores remotos ativos, caracterizados pela operação na faixa espectral das micro-ondas. Sensores SAR possuem como uma das principais vantagens a aquisição de dados remotos mesmo em condições (aerossóis e cobertura de nuvens), diferente dos sensores óticos (RICHARDS, 1993). Além disso, os sensores SAR pertencem à classe de sensores ativos, produzindo o próprio pulso de radiação eletromagnética que interage com a superfície, parte da qual retorna ao sensor trazendo informações sobre a natureza dos elementos terrestres. Esta propriedade permite o imageamento independente da disponibilidade de luz solar. A quantidade de radiação retornada ao sensor após a emissão do pulso é a medida fundamental dos sensores SAR, e pode ser representada pelo coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^0$ ), i.e. a proporção entre a quantidade de radiação emitida e a quantidade espalhada pela superfície de volta ao sensor (ULABY et al., 1981). Enquanto dados óticos normalmente representam os elementos superficiais da paisagem, dados de radar oferecem uma gama de dados, como volumétricos e sub-superficiais. Isso é possível através da interpretação da energia incidente retroespalhada pelo alvo, permitindo uma ampla variedade de tipos de aplicação, como mapeamento topográfico e detecção de mudanças da paisagem (RICHARDS, 1993).

A utilização de dados de radar deve considerar os parâmetros do sistema de imageamento, que influenciam o retroespalhamento, e, conseqüentemente, o dado final recebido pela antena de radar: (i) comprimento de onda da radiação eletromagnética, variável que determina a capacidade de penetração e interação do pulso de microondas com os alvos (ULABY et al., 1981); (ii) ângulo de incidência, que influencia a quantidade de energia

espalhada pela superfície e a aparência dos alvos na imagem (Figura 1); e (iii) polarização, parâmetro que descreve a orientação do campo elétrico de uma onda eletromagnética e influencia no grau de penetração em um alvo (DALLEMAND et al., 1993).

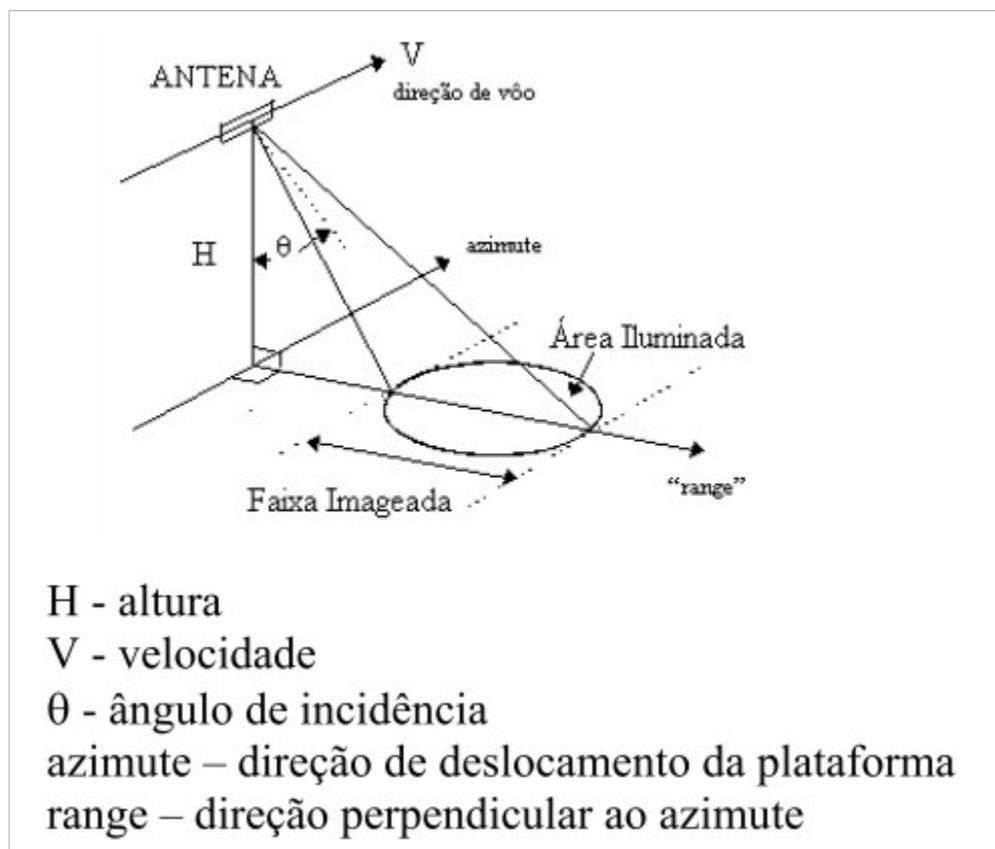


Figura 1: Ângulo de incidência ( $\theta$ ) (Fonte: FRANÇA, 2005).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Área de estudo

O sistema lacustre Manaquiri-Janauacá (3°26'56" S; 60°22'40" O) é composto por um complexo de lagos interligado, destacando-se entre eles, além dos próprios Manaquiri e Janauacá, o Lago Grande, o Lago Mirauá e o Lago Caapiranga (Figura 2). Durante a seca, esses lagos conectam-se ao rio Solimões através do paraná do Janauacá, enquanto, durante a cheia, a maioria comunica-se diretamente com o rio (CARVALHO, 1983). Localizado no Baixo Solimões-Alto Amazonas, o sistema encontra-se próximo às cidades de Manacapuru e Manaus (AM). Esse fator contribui significativamente para o impacto antrópico na região dos lagos, que possui marcante presença humana ocupando suas margens e sobrevivendo de seus recursos.

O arranjo geomorfológico da bacia Amazônica está diretamente relacionado à sua estrutura geológica e litológica. A atual morfologia começou a se desenvolver no período Terciário (AB'SÁBER, 2003). Do Cretáceo Superior em diante, enquanto as bacias mesozóicas marginais foram alteadas, a região amazônica permaneceu em um nível relativamente deprimido, onde se desenvolveram processos de aplainações complexas, as quais reduziram até mesmo a faixa ocidental deformada da bacia (AB'SÁBER, 2003).

Destacam-se quatro faixas distintas de relevo na bacia Amazônica: (i) os extensos terrenos aluviais; (ii) os baixos platôs terciários ("tabuleiros"); (iii) as formas de terrenos colinosas correspondentes às áreas de exposição de terrenos paleozóicos; e (iv) os terrenos cristalinos rebaixados por processos de pediplanação (AB'SÁBER, 2003).

O Rio Solimões-Amazonas transporta 1240 Mt/ano de sedimentos, e outras 3200 Mt/ano são erodidas e depositadas, configurando uma complexa planície de inundação com diferentes padrões de feições geomorfológicas (MERTES et. al, 1996). Apesar da importância do desenho superficial na

configuração da hidrografia, o padrão da rede de drenagem da Bacia Amazônica foi fortemente influenciado pelos controles estruturais desde a origem da bacia (CAPUTO, 1984). Quatro arcos estruturais cruzam o vale do canal principal do rio Amazonas, marcando a influência tectônica sobre a geomorfologia do conjunto canal-planície de inundação nesta escala espacial (MERTES et. al., 1996). O sistema Manaquiri-Janauacá encontra-se a leste do Arco do Purus.

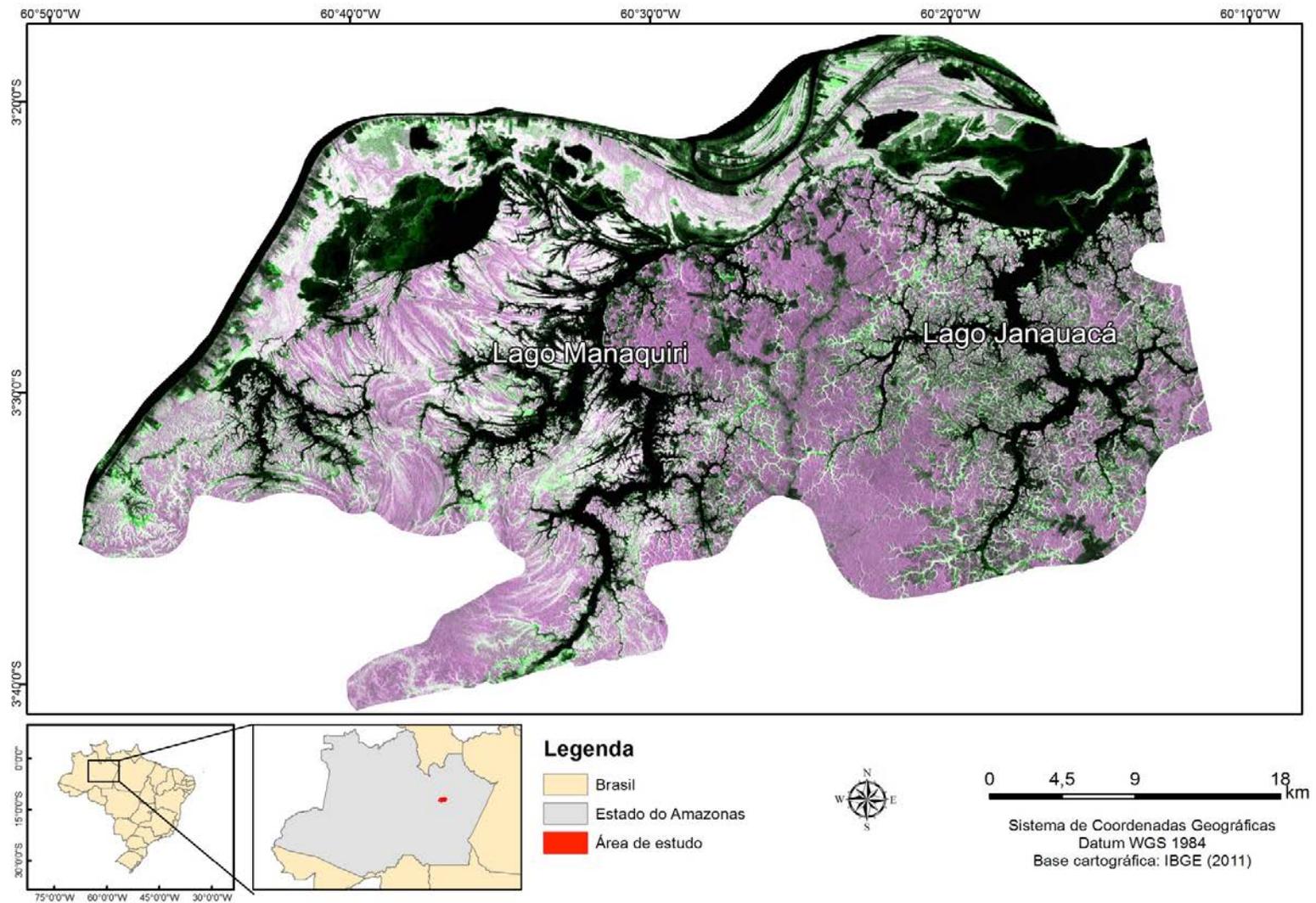


Figura 2: Localização da área de estudo sobre imagem ALOS/PALSAR.

### 3.2. Dados de sensoriamento remoto

As imagens de radar de abertura sintética do sensor ALOS/PALSAR utilizadas nesse estudo foram obtidas por meio da iniciativa ALOS Kyoto & Carbon (K&C), através de projetos liderados consecutivamente pelo Dr. Bruce Rider Forsberg, do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), e pelo Dr. Thiago Sanna Freire Silva, do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, da Universidade Estadual Paulista (UNESP), além de projeto de pesquisa sobre as aplicações do sensor ALOS-2/PALSAR-2, também liderado pelo Dr. Thiago Silva, sendo que ambos projetos recebem apoio da Agência Espacial Japonesa (JAXA).

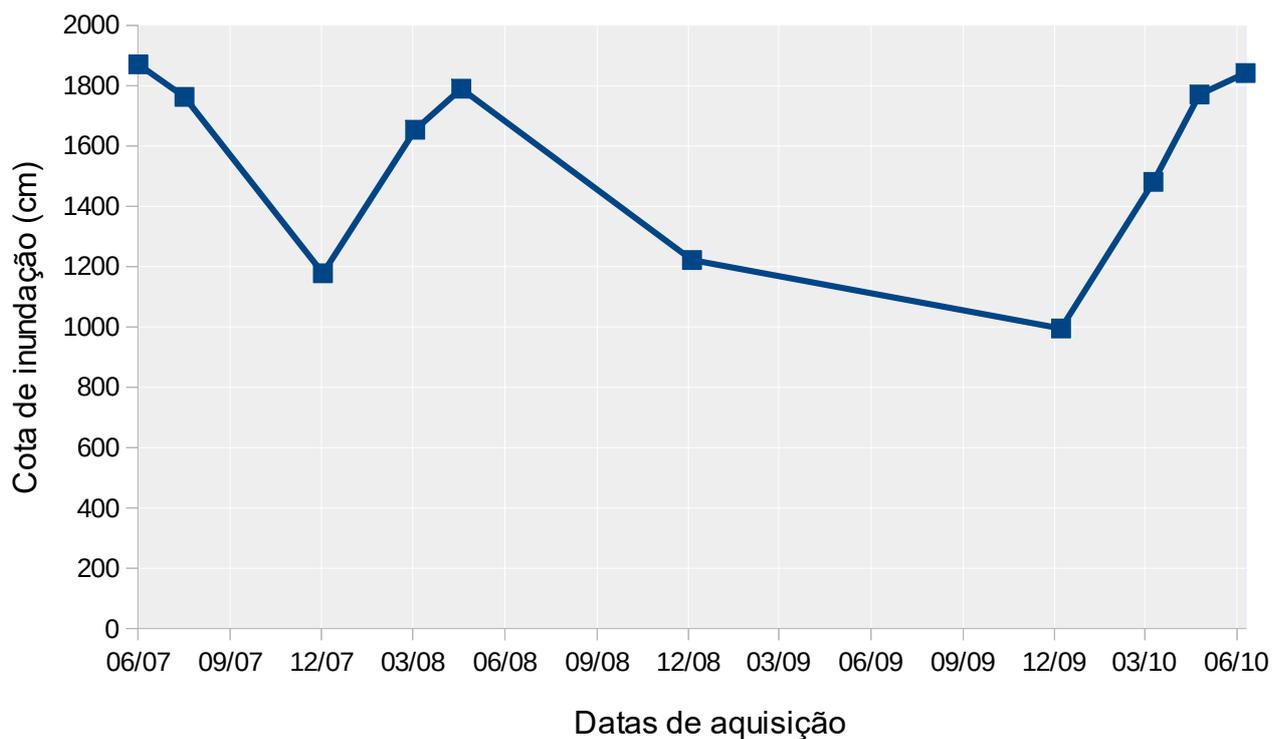


Figura 3: Cotas de inundação e datas de aquisição das imagens ALOS/PALSAR.

As imagens de radar foram adquiridas em banda L (23.6 cm), comprimento de onda sensível à caracterização de variações na estrutura florestal e à inundação sob o dossel, permitindo a quantificação da distribuição e representatividade de áreas inundadas (HESS et al., 2003; HAWES et al., 2012). A seleção das cenas levou em consideração a altura de inundação no momento da aquisição da imagem, registrada em estações fluviométricas próximas, a fim de garantir a boa representação de diferentes condições ao longo do pulso de inundação. As cotas de inundação foram obtidas junto à régua da Agência Nacional de Águas (ANA) mais próxima da região de interesse.

O estudo ainda contou com imagens auxiliares, a saber: dados SRTM do projeto Topodata ([www.dsr.inpe.br/topodata](http://www.dsr.inpe.br/topodata)) e dados óticos fornecidos gratuitamente pelos sistemas Bing Maps ([www.bing.com/maps](http://www.bing.com/maps)) e Google Earth ([www.google.com/earth](http://www.google.com/earth)). A missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) realizou uma cobertura topográfica de toda a superfície terrestre, através da implantação de um sistema de radar de abertura sintética (SIR-C/X-SAR) a bordo do ônibus espacial Endeavour, onde dados de altimetria foram obtidos através de interferometria. Os produtos SRTM são disponibilizados na forma de Modelos de Elevação Digital com resolução espacial de 90 metros, precisão vertical de 16 metros e precisão horizontal de 20 metros. O projeto Topodata disponibiliza esses dados após um processamento computacional para refinamento no tamanho do pixel de 90 para 30 metros, sendo interpolados pelo método de krigagem (VALERIANO et al., 2009). Sobre as imagens Bing e Google, poucas informações a respeito de suas características são fornecidas pelas empresas. Segundo levantamento de Sztutman (2014), é possível confirmar a seguinte base para os sistemas: imagens de média resolução, como Landsat 7 (resolução espacial de 15 metros) e SPOT 2 e 4 (10 metros de resolução); imagens de alta resolução, como SPOT 5 (5 e 2,4 metros de resolução), Ikonos (1 metro) e GeoEye (0,5 metros); e fotografias aéreas com resolução de 0,5 metro ou menos.

### 3.3. Processamento dos dados

As cenas ALOS/PALSAR foram adquiridas em dois modos de imageamento: Fine Beam Single (FBS), somente com a polarização HH, e Fine Beam Dual (FBD), com as polarizações HH e HV. O modo Fine Beam é caracterizado pela alta resolução espacial, com uma faixa imageada de ~ 70km, 38.7° de ângulo de incidência (no centro da cena) e 12.5m de tamanho de pixel (ROSENQVIST et al. 2007).

As imagens foram adquiridas no nível de processamento 1.5, ou seja, já calibradas geométrica e radiometricamente (ROSENQVIST et al, 2007), e convertidas para escala linear, a fim de avaliar a resposta do sinal da imagem. Os resultados finais foram convertidos para coeficientes de retroespalhamento, expressos em decibéis (dB), o que permite comparações com a literatura existente. Para os produtos PALSAR modo Fine Beam, a conversão segue a Equação 1, onde DN é a amplitude do sinal, expressa em número digital, e -83 é o coeficiente de calibração para produtos PALSAR (SHIMADA et al., 2009):

$$\sigma^0 = 10 * \log_{10}(DN^2) - 83$$

### 3.4. Análise dos dados

A classificação da inundação foi baseada na metodologia de Ferreira-Ferreira et al. (2015), combinando imagens multitemporais SAR e técnicas de análise de imagens baseada em objetos (object based image analysis, OBIA, BLASCHKE, 2010). Diferente das técnicas padrão de classificação, que trabalham pixel a pixel, os métodos OBIA iniciam o processo de análise agrupando pixels através de algum critério de homogeneidade, segmentando a imagem em polígonos (objetos) homogêneos, e permitindo o uso de outros atributos além do valor numérico do pixel na classificação, como textura e geometria das feições (BLASCHKE, 2010).

Na segmentação, foram utilizadas as imagens SAR, com o objetivo de gerar objetos que refletem a dinâmica da inundação das áreas estudadas. Com a aplicação do algoritmo de segmentação multirresolução implementado no software eCognition 8.0 (DEFINIENS, 2009), a média do sinal retroespalhado foi computada para cada objeto da imagem, para cada uma das datas e polarizações disponíveis.

O mapa de extensão da inundação foi gerado com base no aumento do retroespalhamento da superfície no momento em que há inundação, por conta do aumento da reflexão do tipo *double-bounce* (HESS et al. 2003; SILVA et al., 2008). Este mecanismo de espalhamento (Figura 4) é potencializado pela formação da lâmina d'água sobre a vegetação, criando uma superfície de reflexão especular para o pulso de microondas. Contudo, a existência de elementos lisos perpendiculares à superfície (troncos) resulta em uma segunda reflexão especular (*double bounce = duplo salto*), retornando quase todo o sinal refletido ao sensor, e dessa maneira caracterizando o forte sinal de retorno, registrado nas imagens como pixels mais claros (HESS et al., 1995; SILVA et al., 2008). Regiões de macrófitas ou vegetação menos densa apresentam comportamento contrário, com pixels de valores escuros, pela menor densidade das folhas e menor ocorrência de *double-bounces*.

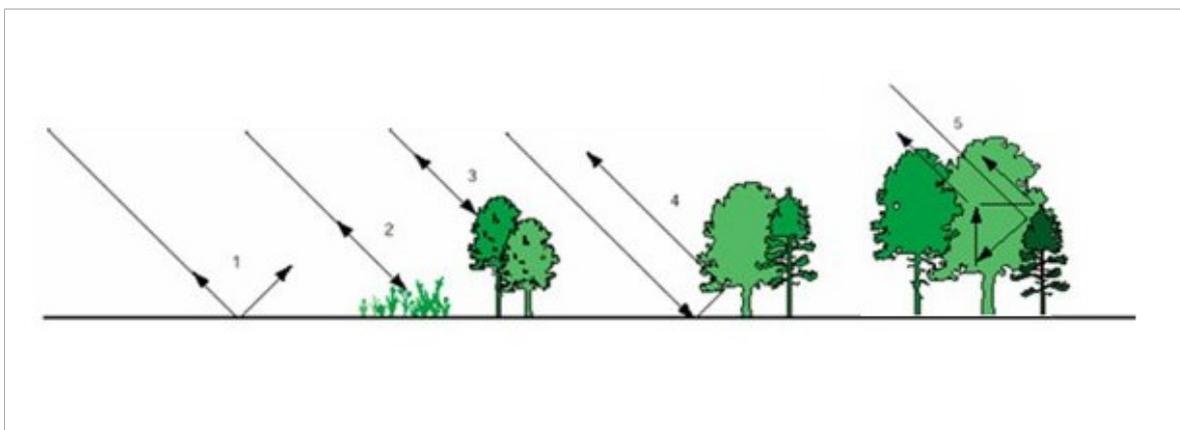


Figura 4: 1) Espalhamento difuso de superfície; 2) e 3) Espalhamento direto de vários componentes vegetacionais; 4) Espalhamento do tipo *double-bounce*; 5) Espalhamento volumétrico (Fonte: FERNÁNDEZ-ORDÓÑEZ et al., 2009).

Mapas de extensão e duração da inundação foram gerados para cada imagem baseados no aumento esperado do sinal SAR em razão do efeito *double-bounce*. Os valores dos limiares de retroespalhamento para separação das áreas inundadas e não-inundadas foram determinados com base na análise gráfica dos valores de retroespalhamento na cena PALSAR e em valores observados em artigos científicos.

Com as áreas inundadas já determinadas para cada imagem na série histórica, cada mapa de inundação foi associado a um nível de água correspondente, de acordo com a Figura 3. A duração média da inundação foi estimada a partir da média histórica da cota de inundação dos dados disponíveis para a estação fluviométrica da ANA de Manacapuru (1972 – 2016), segundo método de Ferreira-Ferreira et al., 2014, e determinando o número de dias por ano em que esta média foi igual ou maior que a altura observada no momento da aquisição de imagem (Figura 5). Um único mapa foi derivado da sobreposição dos diversos mapas de inundação em diferentes cotas e áreas inundadas entre as cotas conhecidas. Foram inseridos ainda dados referentes aos corpos d'água permanentes e cobertura de macrófitas.

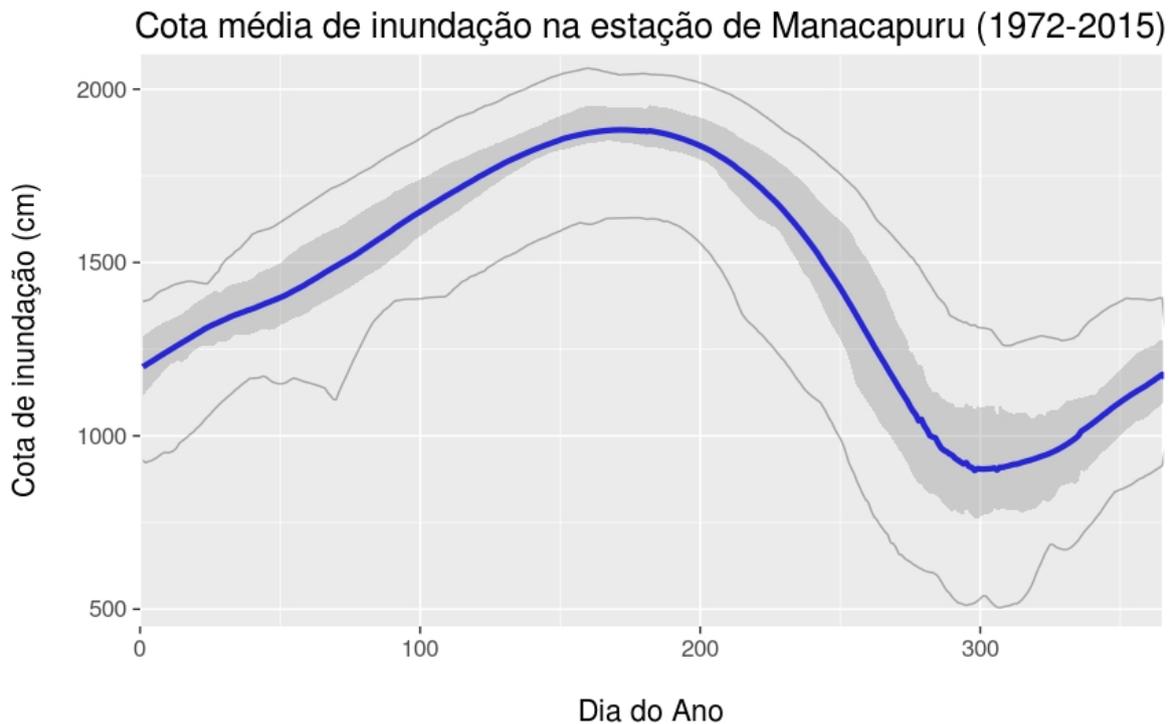


Figura 5: Cota média de inundação na estação de Manacapuru entre 1972 e 2016.

A partir das imagens ALOS/PALSAR, os canais fluviais do sistema Manaquiri-Janauacá foram mapeados através de interpretação visual e resposta radiométrica, na escala de 1:20.000. Para apoiar a interpretação das imagens de radar, foram utilizadas imagens óticas dos sistemas Bing Maps e Google Earth , além do modelo digital de elevação do projeto Topodata , que possibilitaram a interpretação das variáveis geomorfológicas na dinâmica da várzea.

A presença e densidade de canais fluviais apontam para um dado nível de conexão entre estes mesmos canais e com o rio Solimões, além de apontar possíveis trajetos percorridos pela água no período de enchente e cheia da planície. Esses dados, sobrepostos aos mapas de inundação, geram um produto que relaciona a abundância e conexão dos canais com a variação espacial e temporal da inundação, possibilitando a interpretação da dinâmica hidrológica da paisagem na várzea do Solimões.

Baseado no conceito de *floodplain hydrologic units* (FHU), apresentado por Trigg et al. (2012), foram estabelecidas unidades hidrológicas na área de estudo, a fim de suportar a interpretação da relação entre a rede de drenagem e a conectividade da várzea. As FHU foram definidas como distintas áreas da planície de inundação classificadas a partir do tipo de conectividade que apresentam em relação a drenagem principal. Partindo dessa ideia (TRIGG et al., 2012), as unidades hidrológicas no presente trabalho foram definidas a partir da interpretação visual da densidade de canais, conectividade e direção do escoamento, deduzido através do dados SRTM.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mapeamento da inundação (Figura 6) revela a várzea do sistema Manaquiri-Janauacá como um complexo mosaico em termos de hidrologia. A porção oeste da área de estudo, compreendida pelo Lago Manaquiri e demais formações associadas, é dominada por inundação a maior parte do ano, trocando água e sedimentos através de uma volumosa rede de canais fluviais. Já a porção leste do sistema, referente ao Lago Janauacá e adjacências, apresenta menor conectividade com outros arranjos hidrológicos nos arredores, apresentando-se como um lago de ria encravado entre a terra firme ao sul e o Rio Solimões ao norte (Figura 7).

O mapeamento interpretativo das FHUs resultou em 27 diferentes unidades. Áreas de conectividade direta, como o caso das unidades 01, 02, 03, 04, 18, 21, 22 e 27 (Figura 8), são responsáveis pelo transporte de água e sedimentos várzea adentro (TRIGG et al., 2012). As unidades 01, 02, 03, 04 e 18 concentram grande parte de sua área inundada na cota de 1178 cm, totalizando 283,76 km<sup>2</sup>. Portanto, é possível aferir que boa parte das trocas entre o Solimões e a várzea ocorrem durante esse aporte de água, correspondente ao mês de dezembro, em média. Já as unidades 21, 22 e 27 apresentam sua maior extensão de inundação entre as cotas 1673 e 1771 cm, totalizando 461,04 km<sup>2</sup> de área inundada entre os meses de maio e agosto.

As unidades localizadas ao norte da área e, conseqüentemente, mais afastadas da drenagem do Solimões, apresentam uma dinâmica de inundação diferente, menos dependente do aporte fornecido pela drenagem principal. Ao norte do Lago Janauacá localizam-se as unidades 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 e 17 (Figura 8), responsáveis pela coleta da água pluvial na porção oriental do terreno, ainda que recebam parte do fluxo do Solimões em alguns períodos do ano. A maior parte dessas unidades recebe o maior aporte de água na cota 1871 cm, que ocorre por volta de julho, totalizando 143,44 km<sup>2</sup> de área inundada.

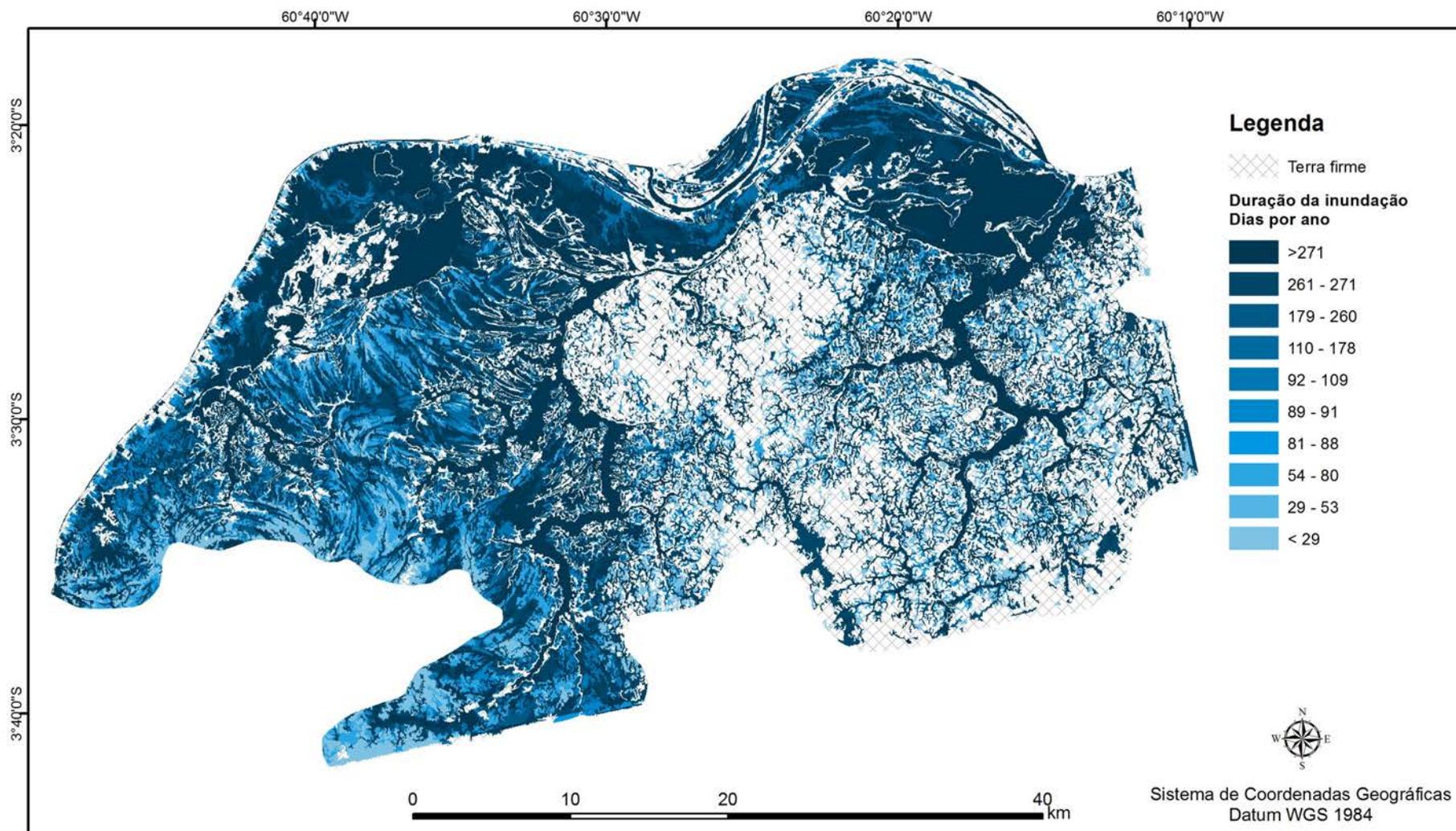


Figura 6: Duração da inundação em dias por ano.

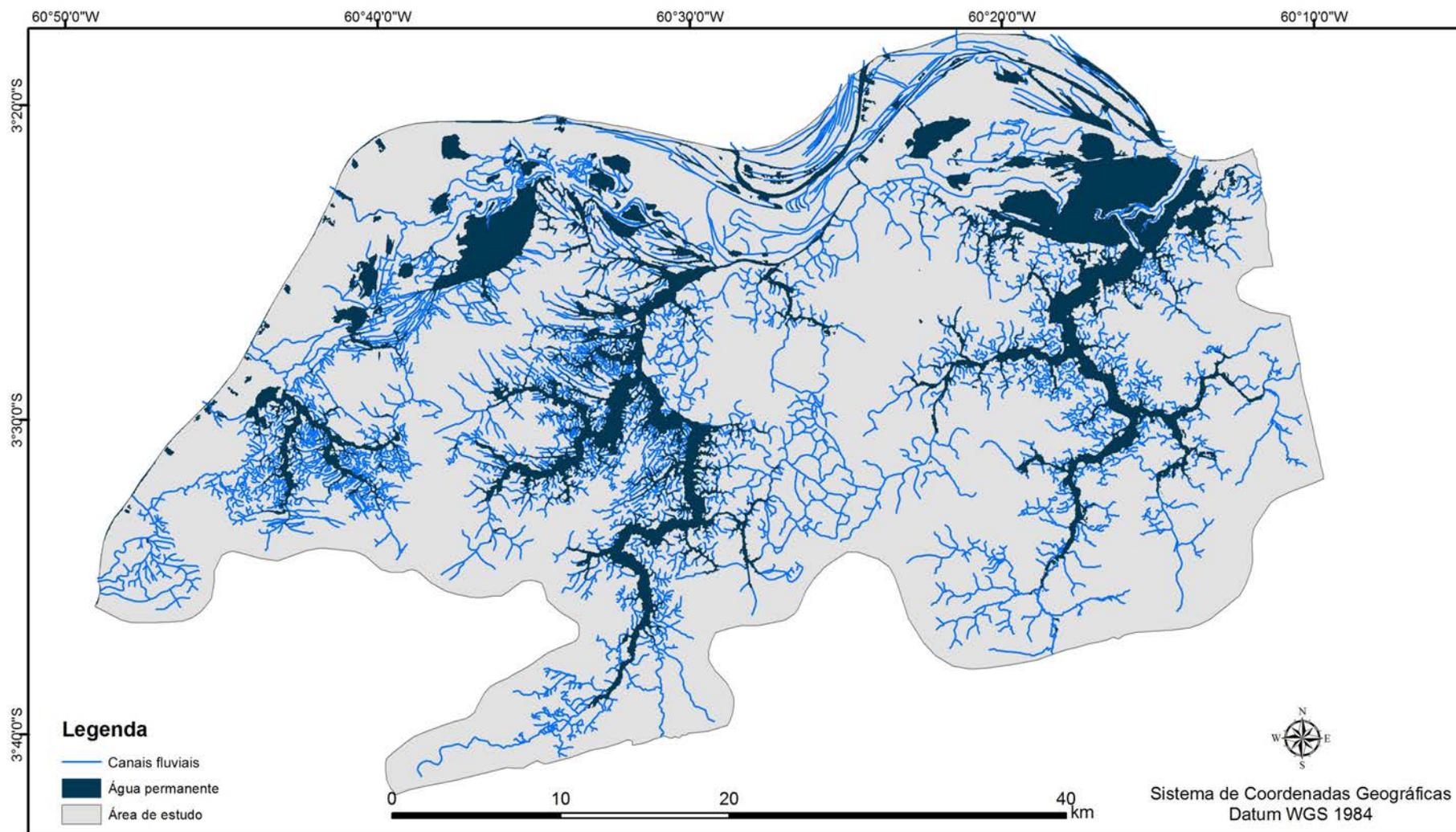


Figura 7: Canais fluviais da planície de inundação, mapeados na escala 1:20.000.

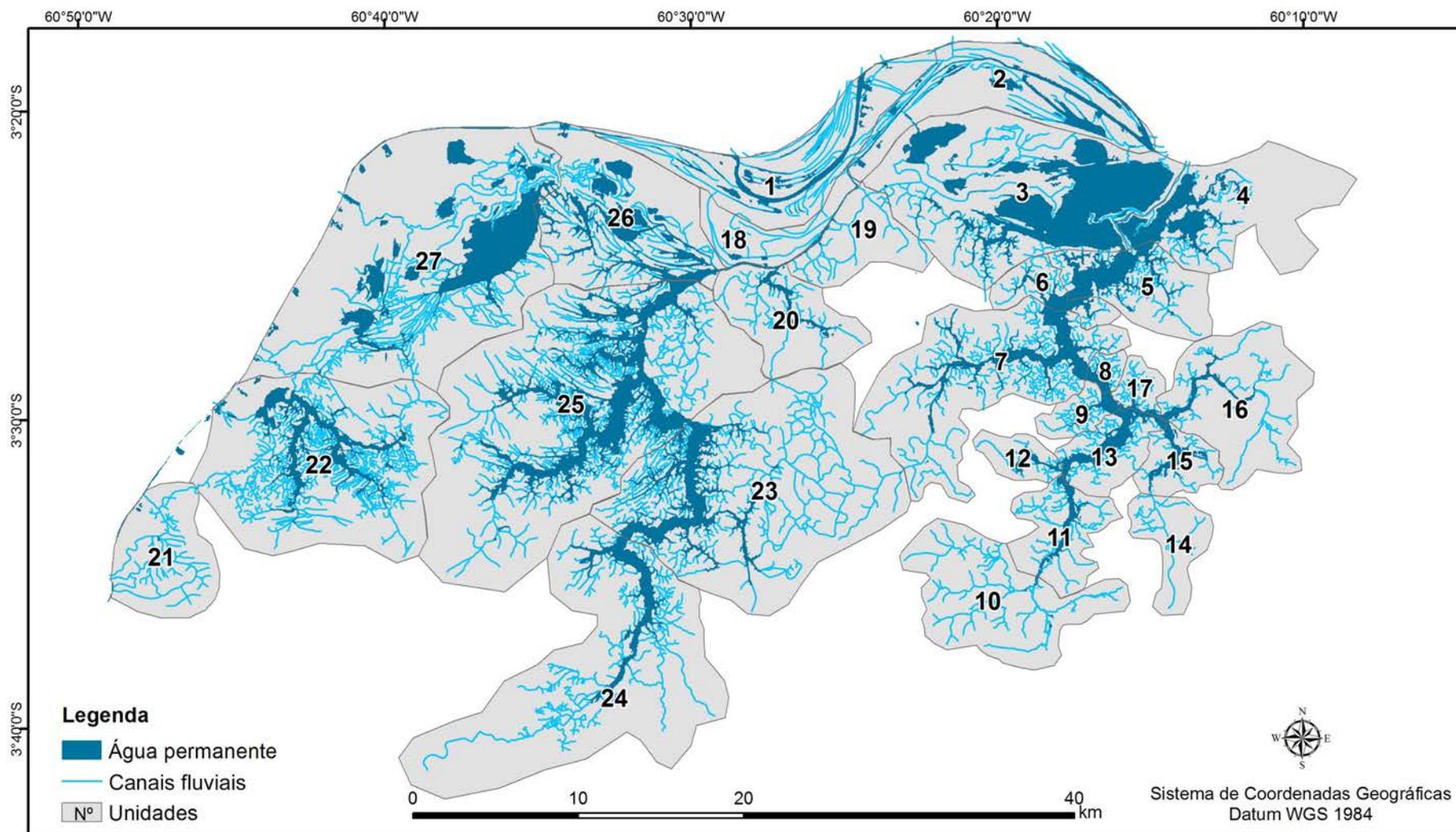


Figura 8: Unidades hidrológicas do sistema Manaquiri-Janauacá.

Em termos estruturais, é possível diferenciar arranjos hidrogeomorfológicos maiores que englobam as unidades (Figura 7 e 8): na porção leste, o sistema Janauacá, lago encaixado entre a terra firme e o Solimões; na porção oeste, o sistema Manaquiri, lago situado na área mais rebaixada do terreno e dominado pela inundação durante o ano; uma porção de terra firme entre os dois sistemas, diferenciando-os enquanto estruturas, isolando o Janauacá a oeste e o Manaquiri a leste; e uma porção alagada durante a maior parte do ano, ao norte, com estruturas morfológicas diferenciadas conhecidas como barras de canal (IBGE, 2009) e elevada ocorrência de macrófitas.

A troca de água e sedimentos entre o Rio Solimões e o sistema Manaquiri-Janauacá ocorre de duas formas observáveis pela abordagem aqui proposta: através do processo de escoamento superficial (GUERRA e GUERRA, 2008), onde a inundação extrapola a calha da drenagem principal e ocupa a planície ao norte, dinâmica especialmente efetiva no Manaquiri; e através dos canais fluviais menores, responsáveis por dinamizar o avanço da água várzea adentro.

É possível observar maior densidade de canais fluviais na porção ocidental da área, principalmente conectando o Manaquiri com o Solimões ao norte e o Lago do Mirajá a noroeste, contando ainda com a presença de barras em pontal, evidenciando a migração dos canais (IBGE, 2009). Considerando que grande parte da dinâmica geoecológica da várzea se dá através da troca de água e sedimentos entre diferentes estruturas da paisagem (JUNK, 1997), é possível afirmar que essa área, que compreende as unidades hidrológicas 23, 24, 25, 26 e 27, mostra-se amplamente conectada em termos ecológicos e hidrológicos (MERTES et al., 1995).

## 5. CONCLUSÕES

O presente estudo buscou utilizar dados obtidos por sensores radares e óticos para interpretação da dinâmica de uma planície de inundação amazônica, a exemplo de Ferreira-Ferreira et al. (2014) e Silva et al. (2015). Em relação à efetividade, os dados oriundos do ALOS/PALSAR mostraram-se eficientes na leitura da dinâmica de inundação, mostrando-se especialmente úteis para a captura da inundação sob o dossel. Inicialmente tomada a título de experimento, o mapeamento dos canais fluviais apresentou resultados satisfatórios, reforçando a multifuncionalidade dos dados de radares.

Compreender a estrutura de uma paisagem tão complexa e repleta de nuances é um grande desafio. Nesse trabalho, o uso de dados de sensoriamento remoto foi a principal ferramenta de análise aplicada e mostrou-se eficiente combinado com dados de campo, como as cotas de inundação geradas pela Agência Nacional de Águas. Em um ambiente que exige grandes investimentos para a realização de trabalho de campo, apoiar-se em dados remotos apresenta uma alternativa palpável de monitoramento para a região amazônica, a maior floresta contínua do mundo (GOULDING et al., 2003) e lar de milhões de brasileiros (MELACK et al., 2004).

## 6. REFERÊNCIAS

AB'SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. Vol. 1. Ateliê Editorial, 2003.

ARNESEN, A. S. et al. Monitoring flood extent in the lower Amazon River floodplain using ALOS/PALSAR ScanSAR images. **Remote Sensing of Environment**, n.130, p.51-61, 2013.

ARRAUT, E. M. et al. Secas extremas na planície de inundação amazônica: alguns impactos sobre a ecologia e a biodiversidade. In: BORMA, L. S.; NOBRE, C. (org.). **Secas na Amazônia: causas e consequências**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

ASNER, G. P. Cloud cover in Landsat observations of the Brazilian Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 18, p. 3855-3862, 2001.

BLASCHKE, T. Object based image analysis for remote sensing. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, n.65, p.2-16, 2010.

CAPUTO, M. V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil**. Santa Barbara: University of California, 1984.

CARVALHO, F. M. Marcação de peixes na região do Janauacá, Manaus (AM). **Acta Amazonica**, n.13(3-4), p.707-708, 1983.

COE, M. T. et al. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River—Land surface processes and atmospheric feedbacks. **Journal of Hydrology**, n.369, p.165-174, 2009.

DALLEMAND, J. F. et al. **Radar imagery: theory and interpretation**. Rome: FAO/ESA, 1993.

FERNÁNDEZ-ORDÓÑEZ, Y. et al. Forest Inventory using Optical and Radar Remote Sensing. In: JEDLOVEC, G. (org.). **Advances in Geoscience and Remote Sensing**. Rijeka, Shanghai: InTech, 2009.

FERREIRA, R. D. et al. Atualização e correção do delineamento de áreas alagáveis da bacia Amazônica. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p.5864-5871, 2013.

FERREIRA-FERREIRA, J. et al. Combining ALOS/PALSAR derived vegetation structure and inundation patterns to characterize major vegetation types in the Mamirauá Sustainable Development Reserve, Central Amazon floodplain, Brazil. **Wetlands Ecology and Management**, v. 23, n. 1, p. 41-59, 2015.

FISCH, G. et al. Uma Revisão Geral sobre o Clima da Amazônia. **Acta Amazonica**  
28(2):101–126, 1998.

FORSBERG, B. R. et al. Factor controlling nutrient concentrations in Amazon floodplain lakes. **Limnology and Oceanography**, v.33, n.1, p.41-56, 1988.

FRANÇA, A. M. S. **Aplicação de sensoriamento remoto no estudo da influência da dinâmica sazonal do Rio Amazonas sobre a morfologia dos sistemas lacustres**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2005.

GLOOR, M. et al. Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 9, p. 1729–1733, 2013.

GOULDING, M. et al. **The Smithsonian atlas of the Amazon**. Smithsonian Books, 2003.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil: 2008.

HAWES, J. E. et al. Landscape-scale variation in structure and biomass of Amazonian seasonally flooded and unflooded forests. **Forest Ecology and Management**, v. 281, p. 163-176, 2012.

HESS, L. L. et al. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. **Remote Sensing of Environment**, n.87, p.404-428, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico de Geomorfologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

JUNK, W. et al. The flood pulse concept in river-floodplain systems. **Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences**, n.106, p.101-127, 1989.

JUNK, W. J. (org.). **The Central Amazon Floodplain**. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997

JUNK, W. J. et al. A classification of major naturally-occurring Amazonian lowland wetlands. **Wetlands**, n.31, p.623-640, 2011.

JUNK, W. J. et al. A classification of major natural habitats of Amazonian white-water river floodplains (várzeas). **Wetlands Ecology and Management**, v. 20, n. 6, p. 461-475, 2012

JUNK, W. J. et al. Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 24, n. 1, p. 5-22, 2014.

KALLIOLA, R. et al. New site formation and colonizing vegetation in primary succession on the Western Amazon floodplains. **Journal of Ecology**, n.79, p.877-901, 1991.

LATRUBESSE, E. M. et al. Grandes sistemas fluviais: geologia, geomorfologia e

paleohidrologia. In: SOUZA, C. R. G. et al. (org.). **Quaternário do Brasil**. Editora Holos, Ribeirão Preto, p. 276-297, 2005.

MELACK, J. M. et al. Regionalization of methane emissions in the Amazon Basin with microwave remote sensing. **Global Change Biology**, n.10, p.530-544, 2004.

MELACK, J. M.; HESS, L. L. Remote sensing of the distribution and extent of wetlands in the Amazon basin. In: JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F. (org.). **Amazonian floodplain forests : Ecochysiology, ecology, biodiversity and sustainable management**. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, 2010.

MERTES, L. A. K. et al. Spatial patterns of hydrology, geomorphology, and vegetation on the floodplain of the Amazon River in Brazil from a remote sensing perspective. **Geomorphology**, n.13, p. 215-232, 1995.

MERTES, L. A. K. Channel-floodplain geomorphology along the Solimões-Amazon River, Brazil. **Geological Society of America Bulletin**, v.108, p.1089-1107, 1996.

PIEPADE, M. T. F. et al. **Phenology, fruit production and seed dispersal of *Astrocaryum jauari* (Arecaceae) in Amazonian black water floodplains**. Universidad de Costa Rica, 2013.

RICHARDS, J. A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction.** Berlin: Springer, 1993

RICHEY, J. E. et al. Sources and routing of the Amazon river flood wave. **Global Biochemical Cycles**, v.3, n.3, p.191-204, 1989.

ROSENQVIST, A. et al. A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol. **Environmental Science & Policy**, v. 6, n. 5, p. 441-455, 2003.

ROSENQVIST, A. et al. ALOS PALSAR: A pathfinder mission for global-scale monitoring of the environment. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, n.45, p.3307-3316, 2007.

SATYAMURTY, P. et al. Rainfall trends in the Brazilian Amazon Basin in the past eight decades. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 99, n. 1-2, p. 139-148, 2010.

SHIMADA, M. et al. PALSAR radiometric and geometric calibration. **Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 12, p. 3915-3932, 2009.

SILVA, T. S. F. et al. Remote sensing of aquatic vegetation: theory and applications. **Environmental Monitoring and Assessment**, n.140, p.131-145, 2008.

SILVA, T. S. F. et al. Capturing the dynamics of Amazonian wetlands using synthetic aperture radar: lessons learned and future directions. In: TINER, R.;

LANG, M; KLEMAS, V. (org.). **Remote Sensing of Wetlands: Applications and Advances**. Boca Raton: CRC Press, 2015.

TRIGG, M. et al. Floodplain channel morphology and networks of the middle Amazon River. **Water Resources Research**, v.48, 2012.

TURNER, K. Economics and wetland management. **Ambio**, p. 59-63, 1991.

ULABY, F. T. et al. **Microwave remote sensing active and passive**. Addison-Wesley, 1981.

VALERIANO, M. M. et al. **Topodata: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfométricos locais em cobertura nacional**. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, v. 25, p. 30, 2009.

WORBES, M. et al. On the dynamics, floristic subdivision and geographical distribution of várzea forests in Central Amazonia. **Journal of Vegetation Science**, n.3, p.553-564, 1992.