

## Detecção de mancha de inundação abaixo da floresta utilizando a coerência multi-temporal entre imagens SAR da banda P

Marcelo Rodrigo Barboza<sup>1</sup>  
Rafael Antonio da Silva Rosa<sup>1</sup>  
Juliano Mota Lázaro<sup>1</sup>  
João Bosco Nogueira Júnior<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bradar Indústria S.A.  
Av. Shishima Hifumi, 2911 – 12244-000 – São José dos Campos-SP, Brasil  
marcelo.barboza, rafael.rosa, juliano.lazaro@bradar.com.br

<sup>2</sup> Santo Antônio Energia S.A.  
Rua Dom Pedro II, 634, sala 510 – 76801-910 – Porto Velho-RO, Brasil  
joaobosco@santoantonioenergia.com.br

**Abstract.** Because of Earth climate changes, big environment problems has occurred in different scales and with different consequences. One of them is the high variation in the level of rivers and water reservoirs, that makes the river monitoring a very relevant activity today. While southern Brazil has suffered with a low river levels, the opposite has occurred in the north: big floods that have affected the local population and also the local fauna and flora. The use of SAR (synthetic aperture radar) seems appropriate for the monitoring of these rivers, as well as independence of atmospheric and lighting conditions, it has frequencies that cross the vegetation and acquires soil information below the forest. This is a factor of utmost importance since most of the time the flooding extends through the interior of the forest, making it impossible to be defined remotely by other sensors. The purpose of this work is to present a methodology capable of identifying and delimiting flooding below the forest using P-band SAR data, calculating the coherence between multitemporal images. Experimental tests were conducted using real SAR data obtained by the airborne sensor OrbiSAR-2 from Bradar in the Brazilian Amazon Forest (Equatorial Rain Forest) and the results showed very good quality detections.

**Palavras-chave:** flooding, forest, multitemporal, coherence, SAR, P-band, inundação, floresta, coerência, multi-temporal, banda P.

### 1. Introdução

Um tema de suma importância na atualidade é o aquecimento global e suas consequências para o planeta, que vão desde fortes ondas de calor a chuvas inesperadas. Este cenário foi percebido no Rio Madeira, localizado em Porto Velho-RO, que em 2014 registrou as maiores cheias observadas em todas as estações fluviométricas da bacia (ABRH, 2015). Com o aumento do volume do rio, áreas de seu entorno acabam sendo inundadas, podendo causar danos tanto aos habitantes que residem na sua proximidade quanto ao próprio meio ambiente. Essas áreas inundadas podem existir tanto em áreas abertas, ou seja, com ausência de vegetação, como em áreas de mata fechada, como florestas. Monitorar a quantidade de água presente nessas áreas é de suma importância na prevenção e controle de impactos ambientais.

O monitoramento das regiões inundadas localizadas em áreas abertas é facilitado através da utilização de imagens que podem ser obtidas por sensores ópticos, já que, por não haver a obstrução das copas das árvores que impedem a sua identificação, a vetorização pode ser realizada sem maiores problemas. Porém, as regiões de mata fechada tornam-se um verdadeiro desafio, pois as copas das árvores dificultam ou impedem a sua visualização através deste tipo de imagem e, conseqüentemente, o seu monitoramento. Para sanar este problema, a tecnologia SAR permite, através do monitoramento com radar e aquisições temporalmente espaçadas (multi-temporais), identificar, delimitar e monitorar as linhas de contorno das áreas inundadas, também denominadas manchas de inundação, tanto em regiões com ausência de vegetação como em regiões de mata fechada. Isso é possível devido às características particulares de penetrabilidade das ondas eletromagnéticas geradas pelo radar,

principalmente as bandas X e P. No caso de regiões abertas, a banda X, com alta resolução espacial, permite a identificação e a vetorização precisa dos rios e corpos d'água visíveis. Já para as regiões de mata fechada, é utilizada a banda P, que possui a característica de penetração através das copas das árvores, permitindo a identificação de água abaixo da floresta.

O objetivo deste trabalho é justamente apresentar um método que utiliza imagens de radar para a vetorização da mancha de inundação tanto em áreas abertas como em áreas de mata fechada.

## 2. Fundamentos

A seguir, serão apresentadas as principais características da banda X e P do radar, assim como, da imagem de coerência P, principal insumo para a vetorização da mancha de inundação abaixo da floresta.

### 2.1. Características das bandas X e P

Com um comprimento de onda de cerca de 3 cm, a banda X reflete em superfícies rugosas dessa ordem de magnitude, dessa maneira, quando uma área é iluminada com a banda X, esta reflete tanto na rugosidade de um terreno sem vegetação quanto na folhagem de áreas cobertas por vegetação. Portanto, modelos digitais de superfície (DSM) podem ser criados a partir da interferometria de dados da banda X. Já a banda P, com um comprimento de onda de cerca de 75 cm, só irá refletir em objetos com essa ordem de magnitude. Sendo assim, as ondas da banda P atravessam a folhagem, só retornando ao radar a partir de uma dupla reflexão no solo e em troncos de árvores suficientemente grandes. Com isso, a interferometria da banda P permite que se criem modelos digitais de terreno (DTM) mesmo em áreas cobertas por vegetação densa (BRADAR, 2016). A Figura 1 ilustra o comportamento das bandas X e P.

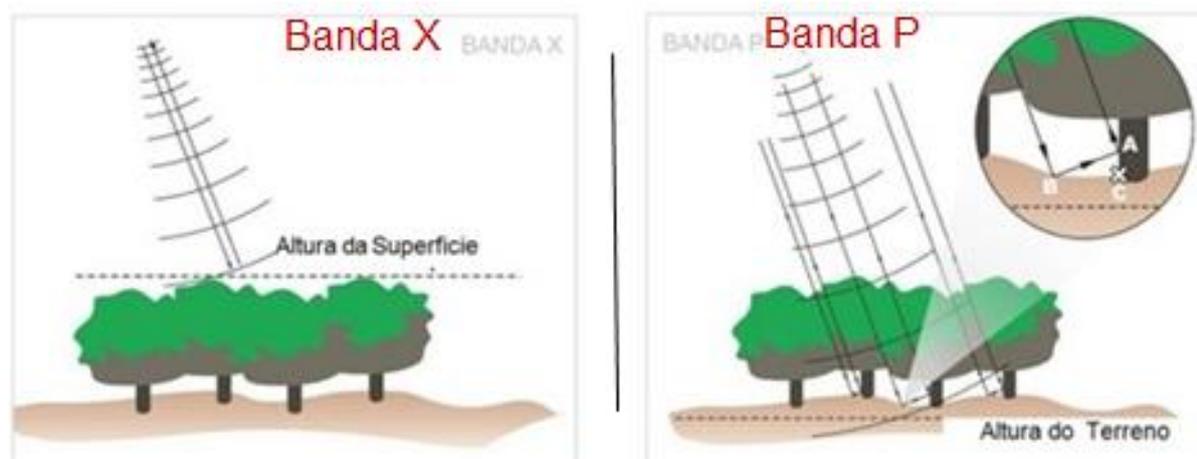


Figura 1. Ilustração do comportamento do sinal do radar, nas bandas X e P.

Nos casos em que o radar emite seu sinal sobre um espelho d'água em uma área aberta, as imagens X e P possuem comportamento semelhante e este sinal não retorna para o radar, assim, o alvo possui valor de brilho muito baixo, próximo do zero (cor preta), conforme mostra a Figuras 2 (a e b).

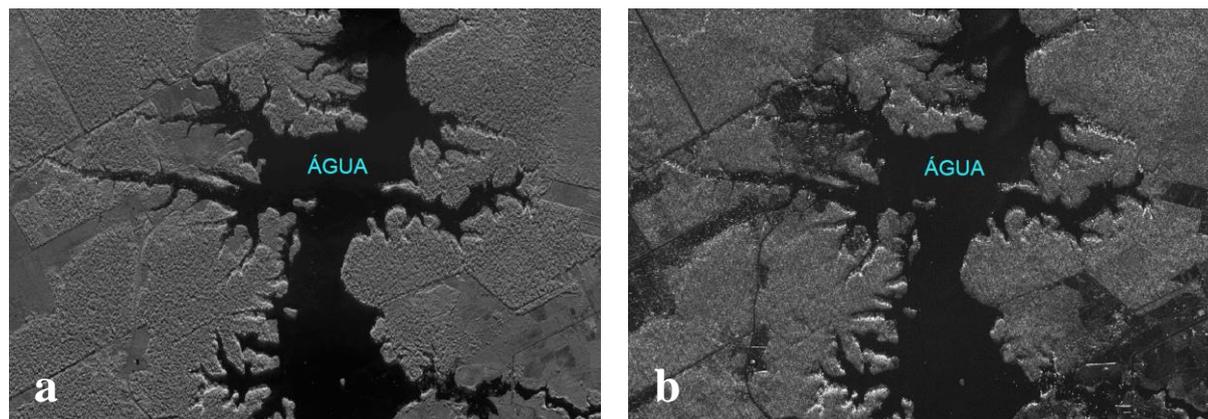


Figura 2. Imagem X, mostrando a resposta do radar para espelho d'água (a) e Imagem P, mostrando a resposta do radar para espelho d'água (b).

## 2.2. Resposta do radar em áreas de vegetação inundada

Quando o radar emite um sinal de banda P em uma área com vegetação inundada, esse sinal atravessa a copa das árvores, encontra a água (que não possui rugosidade) e este sinal que, a princípio, não retornaria para o radar, rebate nos caules de árvores existentes e retorna ao radar. Isso faz com o que o sinal retorne de maneira mais forte, gerando um brilho mais intenso nestas áreas (próximo da cor branca). Para estes casos, de vegetação inundada, a imagem de banda X não tem grande contribuição, já que, em sua resposta, é possível a identificação apenas das copas das árvores. A Figura 3 (a e b) mostram os casos citados.

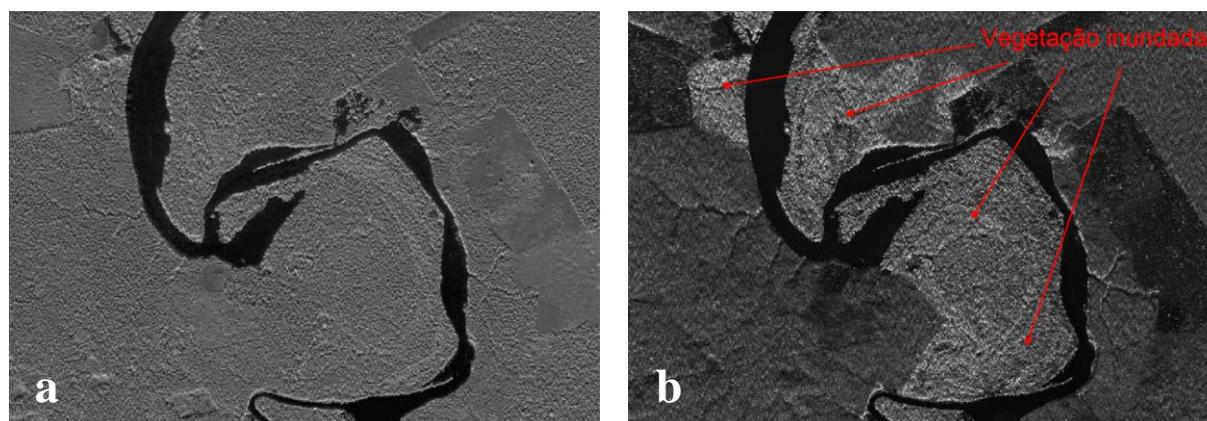


Figura 3. Imagem banda X, onde não é possível a percepção da vegetação inundada (a) e Imagem P, mostrando claramente a vegetação inundada (b).

## 2.3. Imagem de coerência

Os produtos do radar sempre apresentam ruídos, que podem comprometer a qualidade das imagens. As possíveis fontes de ruído presentes em interferogramas são principalmente as seguintes: ruído speckle, ruído térmico, decorrelação espacial, processo de registro, processamento SAR, amostragem e decorrelação temporal (no caso de duas aquisições, como no caso desse trabalho) (ROSA, 2004).

Geralmente utiliza-se, para medir a qualidade de um produto SAR interferométrico, o coeficiente de correlação complexa, dado por (JUST, 1994):

$$\Gamma = \frac{E[p_1 p_2^*]}{\sqrt{E[|p_1|^2] E[|p_2|^2]}} \quad (1)$$

onde  $E[.]$  é o valor esperado e,  $p_1$  e  $p_2$  são, respectivamente, os pixels complexos do par de imagens interferométricas 1 e 2.

Na prática, o coeficiente de correlação complexa é calculado por:

$$\Gamma = \frac{\langle |p_1 p_2^*| \rangle}{\sqrt{\langle |p_1|^2 \rangle \langle |p_2|^2 \rangle}} \quad (2)$$

onde  $\langle . \rangle$  indica um operador de média espacial.

A representação do módulo do coeficiente de correlação complexa,  $|\Gamma|$ , é também conhecida como *imagem de coerência*, que nada mais é que um indicador de correlação entre as duas imagens. Regiões de baixa coerência são áreas onde a relação sinal-ruído é muito baixa, como por exemplo, onde há presença de água. A imagem de coerência é muito útil na verificação da qualidade dos dados disponíveis.

#### 2.4. Coerência multi-temporal da banda P

Aplicando-se a mesma fórmula da imagem de coerência descrita anteriormente, mas, ao invés de duas imagens interferométricas, utilizando-se duas imagens multi-temporais com a mesma geometria de aquisição, obtém-se um produto indicador de mudanças, pois as regiões de baixa coerência correspondem às áreas onde há uma desconexão temporal entre os dois voos.

No caso do monitoramento de bordas de rios, essa desconexão temporal pode ser causada pelo avanço ou recuo das águas, como mostrado na Figura 4.

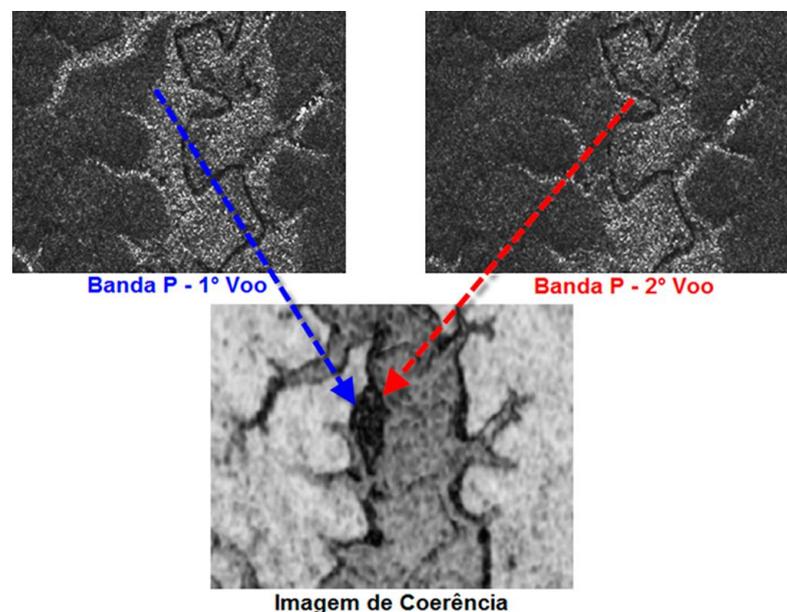


Figura 4. Imagem de coerência multi-temporal da banda P, mostrando o local onde a correlação entre as duas aquisições está baixa, ou seja, houve um recuo de água entre o 1º e o 2º voo.

### 3. Metodologia de Trabalho

A metodologia para a vetorização da mancha de inundação apresentada neste artigo foi desenvolvida utilizando-se como base a interpretação das imagens de radar, obtidas pelo sensor aerotransportado OrbiSAR-2 da Bradar, durante um projeto de monitoramento em uma escala de 1:10.000 do entorno do reservatório do Rio Madeira, localizada no município de

Porto Velho, no estado de Rondônia, onde está situada a hidrelétrica Santo Antônio. A Figura 5 apresenta, com auxílio de imagem do Google Earth®, a área do projeto de monitoramento.

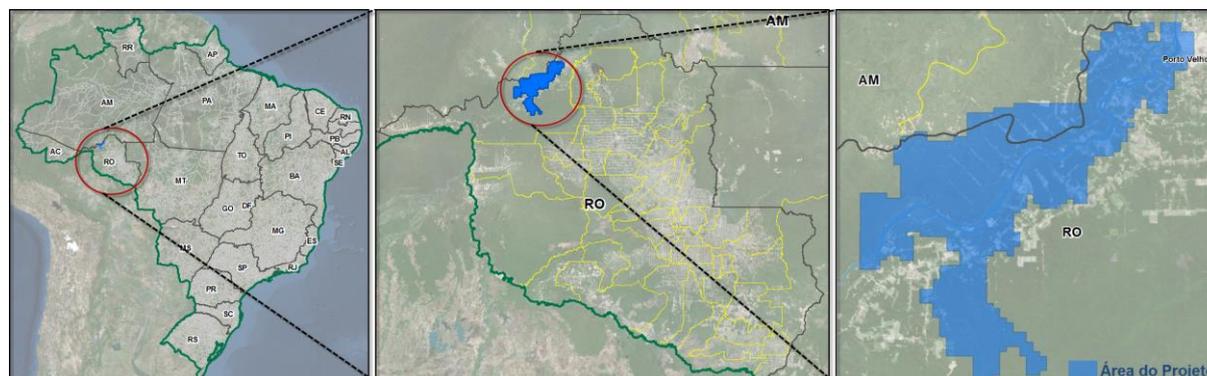


Figura 5. Localização da área do projeto, onde o experimento foi realizado.

### 3.1. Método Proposto

A metodologia proposta neste trabalho segue o fluxo presente na Figura 6 e é detalhado a seguir, a partir das 3 fases incluídas neste fluxo.

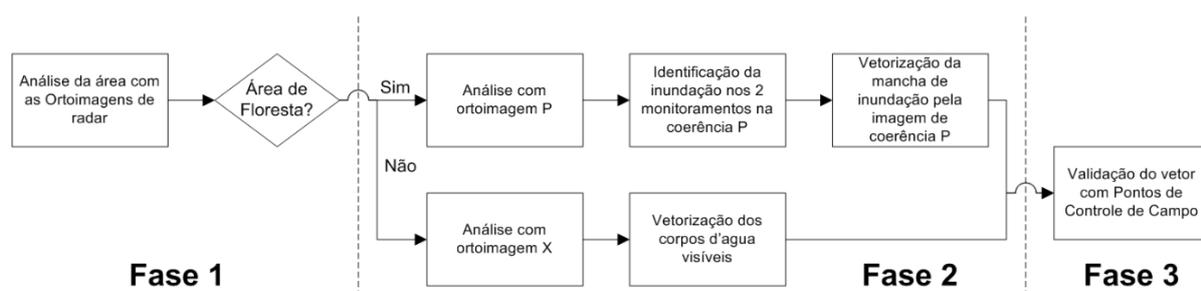


Figura 6. Fluxo para delimitação da mancha de inundação a partir dos insumos do radar.

**Fase 1** – Esta fase consiste na análise visual da área do entorno do reservatório utilizando-se as ortoimagens X e P do radar, para a constatação da existência de áreas de florestas e/ou áreas abertas. Esta constatação é importante, pois determinará se a vetorização da mancha de inundação será realizada a partir da ortoimagem X (áreas abertas, Figura 2 (a)) ou ortoimagem P e imagem de coerência P (florestas ou vegetações inundadas, Figuras 3 (b) e 4).

**Fase 2** – Nesta fase é realizada a vetorização da mancha de inundação, conforme as características determinadas pela Fase 1.

a. Para área de florestas:

- Utilização das ortoimagens banda P para identificação visual das áreas com vegetação inundada;
- Identificação de qual das duas datas de monitoramento há um maior volume de água para que se possa estabelecer a posição da água de cada monitoramento na imagem de coerência P;
- Vetorização da mancha de inundação a partir da imagem de coerência multi-temporal da banda P, com apoio das curvas de nível para interpretação do relevo no entorno do reservatório;

b. Para áreas abertas:

- Utilização das ortoimagens banda X das duas datas de monitoramento para identificar qual está com maior volume de água;

- Vetorização dos rios e corpos d'água a partir das ortoimagens de banda X e apoio das curvas de nível para interpretação do relevo no entorno do reservatório;

**Fase 3** – Esta é a fase de validação dos resultados obtidos na delimitação da mancha de inundação vetorizada a partir das imagens de radar, comparando-se com pontos coletados em campo nas margens do rio.

#### 4. Resultados Experimentais

Implementou-se o método proposto em linguagem IDL (*Interactive Data Language*) e usou-se as orto-imagens SAR multi-temporais adquiridas pelo sensor SAR aerotransportado OrbiSAR-2 da Bradar cedidas pela empresa Santo Antônio Energia. Essas imagens multi-temporais foram coletadas, nas bandas X e P, em fevereiro e março de 2014, com intervalo de 30 dias entre elas, na região de Porto Velho-RO e processadas em São José dos Campos-SP pela Bradar, com a configuração apresentada na Tabela 1, abrangendo um total de 2.938,59km<sup>2</sup> em cada uma dessas duas aquisições.

Tabela 1. Configuração do sensor OrbiSAR-2 (ROSA, 2015).

Configuração	Banda X	Banda P
Aeronave	Turbo-commander	Turbo-commander
Altitude	6086,62 m	6086,62 m
Comprimento de onda	3,125 cm	74,94 cm
Off-nadir	20°	10°
Swath	14 km	7 km
Tamanho do Pixel	1,0 m	1,0 m

Aplicou-se as fases 1 e 2 da metodologia proposta e comparou-se a mancha de inundação vetorizada com sua posição real, obtida por meio de pontos de controle coletados em medições realizadas em campo, com auxílio de GPS (Fase 3), exatamente no mesmo dia em que os voos foram realizados.

A Tabela 2 apresenta a distância planimétrica da mancha de inundação vetorizada em relação aos pontos de controle coletados em campo.

Tabela 2. Pontos de controle coletados em campo, data da medição, coordenadas E e N e distância planimétrica da mancha de inundação vetorizada em relação ao referido ponto de controle de campo.

Ponto de controle	Data da medição	Coordenada E	Coordenada N	Distância (m)
P01	31/03/2014	361664,223000	8997029,144000	0,01
P02	31/03/2014	356220,000000	8994672,000000	0,10
P03	31/03/2014	384534,546000	9019190,306000	0,51
P04	31/03/2014	393619,377000	9025847,564000	0,52
P05	31/03/2014	373113,018000	9004424,482000	0,69
P06	31/03/2014	381035,403000	9016101,437000	0,71
P07	31/03/2014	332898,000000	8989161,000000	0,80
P08	31/03/2014	366671,370000	8997863,346000	0,97
P09	31/03/2014	380775,712000	9006455,350000	1,02

P10	31/03/2014	383177,000000	9010637,000000	1,06
P11	31/03/2014	372506,000000	9004582,000000	1,57
P12	31/03/2014	386103,323000	9019757,882000	1,90
P13	31/03/2014	324930,042000	8982586,851000	2,10
P14	31/03/2014	336025,000000	8987339,000000	2,70
P15	31/03/2014	374684,000000	9004702,000000	4,69
P16	31/03/2014	369701,368000	9001481,945000	5,30
P17	31/03/2014	323267,684000	8980640,420000	12,00
P18	31/03/2014	388473,000000	9022910,000000	14,80

Comparando-se os resultados obtidos com esses pontos de controle, obtém-se um erro médio de 2,86m e um desvio padrão de 4,12m.

A Figura 9 exhibe a mancha de inundação vetorizada a partir do método proposto, assim como a localização e representação dos pontos de controle coletados em campo ao longo do reservatório.

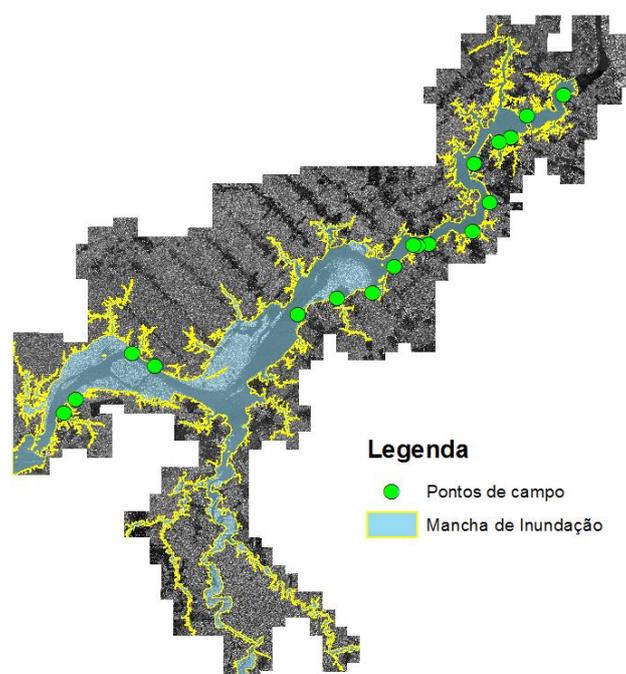


Figura 9. Mancha de inundação e pontos de controle coletados em campo sobre imagem de amplitude banda P.

## 5. Conclusões

A partir dos resultados alcançados através da comparação com a verdade de campo, conclui-se que a metodologia proposta possui um grau de assertividade muito bom, mostrando ser uma ferramenta interessante e útil para o monitoramento de inundações de áreas no entorno de rios em regiões de florestas densas. Essa afirmação é justificável tendo em vista que o padrão de exatidão cartográfica da planimetria dos produtos cartográficos para a escala de 1:10.000 é de 5 metros (0,5mm x escala do projeto), PEC-A.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Santo Antônio Energia S.A. pela cessão dos dados SAR multi-temporais adquiridas na região de Porto Velho e pelo fornecimento das curvas de nível com

equidistância de 0,50m, que foram de grande valia no apoio a vetorização da mancha de inundação, auxiliando na interpretação do relevo existente no entorno do reservatório.

### Referências Bibliográficas

A cheia do Rio Madeira. Causas e Consequências na UHE Santo Antônio e Região. Disponível em: <[http://www.abrh.org.br/icfm6/apresentacoes/16\\_09\\_11h00\\_delfino\\_luiz.pdf](http://www.abrh.org.br/icfm6/apresentacoes/16_09_11h00_delfino_luiz.pdf)>. Acesso em: 04.out.2016.

Just, D.; Bamler, R. Phase statistics of interferograms with applications to synthetic aperture radar. **Applied Optics**, v. 33, n. 20, p. 4361-4368, 1994.

Radar ORBISAR-RFP. Disponível em: <[http://www.bradar.com.br/images/folders/sensore/folder\\_Tecnologia%20OrbiSAR-RFP.pdf](http://www.bradar.com.br/images/folders/sensore/folder_Tecnologia%20OrbiSAR-RFP.pdf)>. Acesso em: 26.out.2016.

ROSA, R. A. S. **Desenvolvimento de um Algoritmo de Desdobramento de Fase para Radar de Imagens Interferométrico Aerotransportado Utilizando uma Linha de Base**. 2004. 106p. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2004.

ROSA, R. A. S.; Fernander, D.; Nogueira, J. B. Detecção de mudanças em imagens SAR multi-temporais das bandas X e P utilizando informações das coerências entre elas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 04.,2015, João Pessoa. Anais... São José dos Campos: INPE, 2015. Artigos, p. 1701–1707.