



Revista Brasileira de Cartografia (2012) N^o 64/5: 565-579
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

APLICAÇÃO DE IMAGENS SAR ORBITAIS EM DESASTRES NATURAIS: MAPEAMENTO DAS INUNDAÇÕES DE 2008 NO VALE DO ITAJAÍ, SC

*Application of Orbital SAR Images in Natural Disasters – 2008 Flood Mapping
in the Itajaí Valley (SC), Brazil*

**Rogério Ribeiro Marinho¹; Waldir Renato Paradella¹;
Camilo Daleles Rennó² & Cleber Gonzales de Oliveira¹**

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR

Av. Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, 12227-010, Brasil.

rogeosr@dsr.inpe.br

waldir@dsr.inpe.br

cleber@dsr.inpe.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Divisão de Processamento de Imagens – DPI

Av. Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, 12227-010, Brasil.

camilo@dpi.inpe.br

Recebido em 10 de maio, 2011/ Aceito em 29 de agosto, 2011

Received on may 10, 2011/ Accepted on august 29, 2011

RESUMO

Em novembro de 2008, chuvas intensas atingiram o estado de Santa Catarina ocasionando grandes inundações. Devido à intensa cobertura de nuvens, não foi possível adquirir imagens de satélite com sensores remotos ópticos. Por outro lado, radares imageadores de abertura sintética (SAR) de diferentes sistemas orbitais (ALOS/PALSAR, ENVISAT/ASAR, RADASAT-2 e TerraSAR-X), coletaram imagens sobre a região. Com isso, este artigo tem como objetivo demonstrar o uso deste acervo de imagens SAR multitemporais, adquiridas sobre a região do Vale do Itajaí para o mapeamento e monitoramento de áreas afetadas por inundações. As imagens foram ortorretificadas, filtradas para redução do ruído *speckle* e convertidas para coeficiente de retroespalhamento (σ^0). O mapeamento das áreas inundadas foi realizado por meio do classificador não supervisionado ISODATA com as imagens em σ^0 . Os resultados mostraram que imagens SAR adquiridas com distintas datas e configurações (frequência, geometria de visada e resolução espacial), possibilitaram a identificação das manchas de inundações e áreas de vegetação alagada, bem como o acompanhamento da dinâmica temporal da inundação, com rapidez e precisão. O uso da informação fornecida por sensores SAR orbitais se mostrou estratégico para ações de gerenciamento de áreas afetadas por desastres naturais, tal qual demonstrado para o evento ocorrido em Santa Catarina no final de 2008.

Palavras chaves: Inundação; Imagens SAR; Vale do Itajaí (SC).

ABSTRACT

In November 2008, the state of Santa Catarina was affected by extreme rainfall which resulted in extensive floods. Due to the intense cloud cover, it was not possible to acquire optical satellite images. However, Synthetic Aperture Radars (SAR) of different orbital systems (ALOS/PALSAR, ENVISAT/ASAR, RADASAT-2 and TerraSAR-X) have acquired data in the region. Thus, this paper assesses the potential of this multitemporal radar dataset acquired over the Itajai Valley (northeastern border of the state) for mapping and monitoring of flood areas. The images were orthorectified, filtered for speckle noise reduction and further converted to backscattering coefficient (σ^0). The mapping of flooded areas was accomplished through the usage of the unsupervised ISODATA classifier based on σ^0 images. The results have shown that SAR images with different acquisition dates and attributes (frequency, viewing geometry, spatial resolution) allowed the identification of flood patches, the areas of flooded vegetation and the detection of the temporal variability of the affected areas. The investigation has also shown that classification for mapping of flooded areas was considered suitable in order to provide information quickly and accurately. The use of the information derived from orbital SAR sensors proved to be strategic for the management actions in areas affected by natural disasters, such as it was demonstrated for the events that occurred in Santa Catarina at the end of 2008.

Keywords: Flood; SAR Images; Itajai Valley (Brazil).

1. INTRODUÇÃO

Anualmente diversos eventos de desastres naturais ocorrem em todo o mundo. De certa forma, devido a sua localização geográfica, o Brasil não está sujeito a desastres naturais de grandes proporções relacionados à dinâmica interna da Terra, como terremotos, *tsunamis* ou erupções vulcânicas. No entanto, diversos eventos ligados à dinâmica externa da Terra, como as inundações, enchentes e deslizamentos de terra ocorrem em diversas regiões do país, e muitas vezes estão relacionados à ocorrência de eventos pluviométricos intensos e prolongados (TOMINAGA, 2009).

Nos últimos anos, episódios de inundações e deslizamentos de terra têm aumentado em intensidade e frequência, causando grandes prejuízos econômicos, sociais e ambientais. A identificação de áreas afetadas por desastres naturais é uma das principais atividades na avaliação de seus danos e de seus efeitos sobre a população. O uso de imagens de sensoriamento remoto em desastres naturais possibilita a obtenção informações de forma rápida, permite uma visão sinóptica para avaliação de riscos, auxilia a tomada de decisões e no estudo de causas e consequências destes eventos (GILLESPIE et al., 2007).

A aplicação de imagens de sensoriamento remoto para o mapeamento de áreas afetadas por desastres naturais pode ser realizada por meio de diferentes tipos de imagens, técnicas e abordagens (JOYCE et al., 2009). Sensores ópticos, que operam no espectro do visível e infravermelho, possibilitam a extração de informações geométricas e espectrais da superfície. No entanto, a coleta de

dados com estes sensores apresenta limitações na presença de cobertura de nuvens, o que é comum em muitos desastres naturais relacionados a eventos meteorológicos.

Por outro lado, sensores SAR (*Synthetic Aperture Radar*) que operam no espectro das micro-ondas, possuem a capacidade de detectar informações geométricas e elétricas de alvos na superfície (PARADELLA et al., 2005). Tais sensores podem adquirir imagens em condições atmosféricas adversas, sobre áreas com cobertura de nuvens ou fumaça, independentemente de iluminação solar e podem adquirir imagens tanto de dia como de noite.

Estas características tornam a aplicação deste tipo de dado uma atividade essencial em ações de gerenciamento de áreas afetadas por desastres naturais, particularmente em eventos de inundações, como demonstrado nos trabalhos de Badji e Dautrebande (1997), Bates et al., (2006), e em Pulvirenti et al., (2011). Estes, e outros trabalhos destacam que corpos d'água como canais de drenagens, áreas úmidas, áreas inundadas e lagos, são facilmente destacados em imagens SAR, devido ao elevado contraste entre superfícies d'água e áreas emersas.

Em novembro de 2008 o estado de Santa Catarina sofreu um dos eventos mais trágicos de sua história. Uma elevada quantidade de chuva atingiu a região leste do estado, principalmente o Vale do Itajaí. Segundo os dados da estação pluviométrica de Blumenau, foram registrados 537 mm de precipitação entre os dias 22 e 24 de novembro. Esse grande volume de água sobre a

região provocou inundações em áreas urbanas e rurais, afetando diretamente mais de 78 mil pessoas no estado (DEDC-SC, 2009).

Devido à cobertura de nuvens sobre a região, não puderam ser obtidas imagens de sensores remotos ópticos das áreas afetadas. Por outro lado, entre os dias 27 de novembro e 01 de dezembro radares imageadores orbitais como o ENVISAT/ASAR, RADARSAT-2 e TerraSAR-X coletaram imagens das regiões atingidas pelas inundações. Estes dados, em conjunto com imagens do sensor ALOS/PALSAR obtidas antes e depois da inundação, constituem um acervo valioso e inédito no país para propósitos de análise multitemporal deste tipo de evento.

Deste modo, este trabalho teve como objetivos: (1) analisar a dinâmica temporal da inundação na região de Gaspar/SC, utilizando imagens adquiridas antes, durante e depois das fortes chuvas de 2008; e (2) detectar a inundação ocorrida em 2008 no Vale do Itajaí utilizando imagens de diferentes sensores SAR.

Para alcançar estes objetivos, este trabalho utilizou métodos e técnicas para o processamento e análise de imagens SAR consolidados, visando obter informações de forma rápida para subsidiar um atendimento emergencial de áreas atingidas por inundações.

Este trabalho foi estruturado da seguinte forma: após a introdução e contextualização, o item a seguir apresenta as principais características das áreas do estudo. O material e a abordagem metodológica utilizada para a realização deste trabalho são tratados nos itens três e quatro, respectivamente. No item cinco são apresentados os resultados e discussões. Por fim, as conclusões e recomendações deste trabalho são apresentadas no item seis.

2. ÁREA DE ESTUDO

Para a realização deste trabalho foram definidas duas áreas de estudo (Figura 1), a primeira para a análise multitemporal da inundação (Área de Estudo 1), e a segunda para o mapeamento da inundação por meio de dados multissensores (Área de Estudo 2). A área de estudo 1 está localizada entre as cidades de Gaspar e Ilhota. A área de estudo 2 corresponde à planície do médio e baixo curso do rio Itajaí-açu, situada entre as cidades de Blumenau e Itajaí.

O Vale do Itajaí pertence à maior bacia hidrográfica do estado de Santa Catarina, a bacia do rio Itajaí, com 15.000 km² e faz parte do sistema de drenagem da vertente Atlântica. O clima da região é definido como subtropical caracterizado pelo verão úmido e quente, com grande incidência de chuvas por toda a bacia (SILVA e SEVERO, 2003). A temperatura média anual varia entre 16°C e 20°C. A precipitação ocorre em duas épocas, uma no verão (entre dezembro a março) e outra mais reduzida na primavera (entre setembro e outubro), com uma média anual da ordem de 1980 mm.

O relevo da região é caracterizado pela presença de serras que alcançam até 980 metros em relação ao nível do mar com encostas muito íngremes, e por áreas mais planas representadas pelas planícies que margeiam o rio Itajaí-açu e seus principais afluentes.

Devido às características hidromórfica do solo e de relevo muito plano, há o predomínio de atividades primárias sobre as planícies, com destaque para a rizicultura e a pastagem. De modo geral, o cultivo de arroz irrigado nesta região é realizado sobre diques com uma lâmina d'água de aproximadamente 8 a 10 centímetros no período de plantio, entre os meses de setembro e outubro. Após a emergência das plântulas a água permanece no dique durante todo o ciclo, até sua colheita, durante os meses de fevereiro e março.

A posição geográfica do Vale do Itajaí, voltada para leste, facilita a entrada de grande quantidade de umidade oriunda do oceano Atlântico, o que favorece a ocorrência de eventos de fortes chuvas, que em muitas vezes resultam em desastres naturais. O registro de ocorrências de inundações na região é antigo. Segundo Pinheiro (2003), a cidade de Blumenau possui documentos que relatam episódios de inundações do rio Itajaí desde o ano de 1850.

O evento de 2008 é considerado resultado da chuva contínua que ocorria sobre a região desde o mês de outubro, em conjunto com uma grande quantidade de precipitação concentrada em poucos dias no mês de novembro. A chuva intermitente durante o mês de outubro e novembro manteve o solo bastante saturado, dificultando a infiltração da água. O volume de precipitação entre os dias 22 a 24 de novembro de 2008 foi associado a um anticiclone estacionado sobre o oceano Atlântico, próximo do litoral de Santa Catarina (SEVERO, 2009).

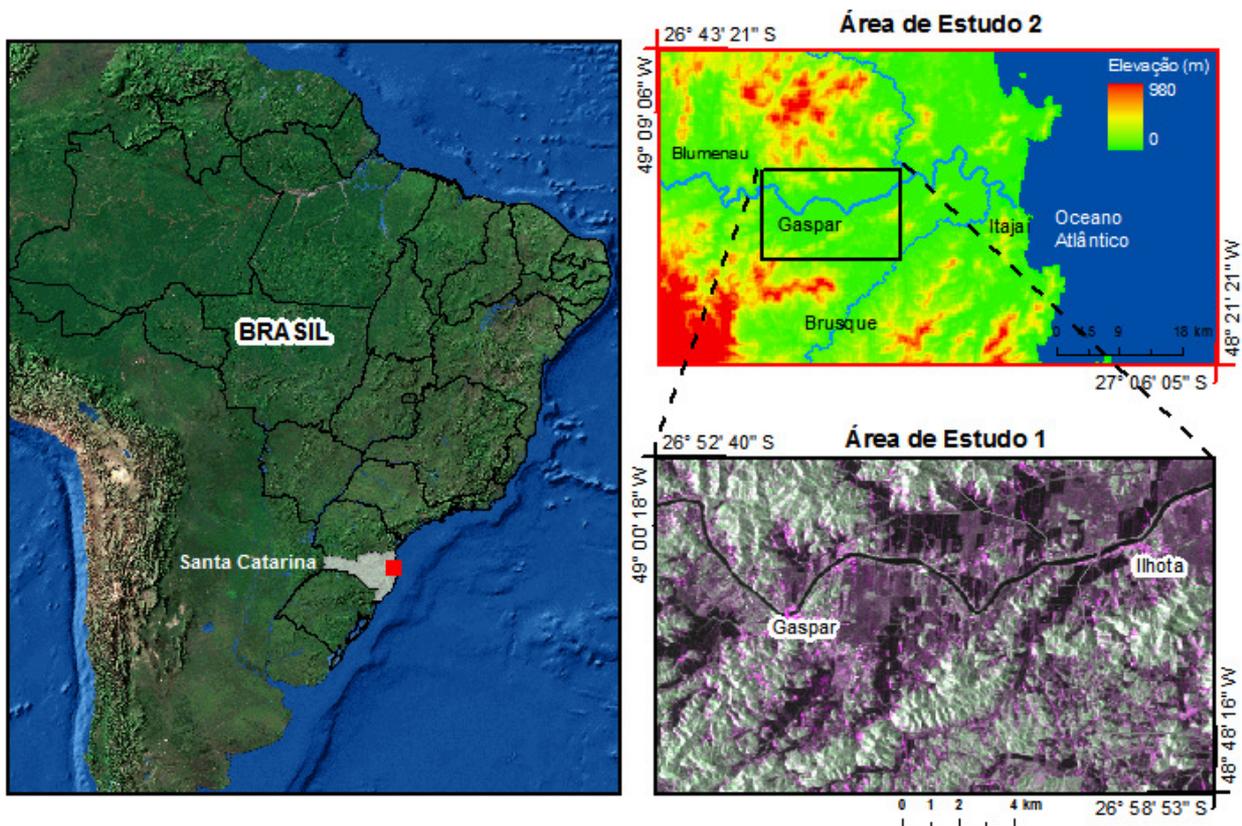


Fig. 1 – Localização das áreas de estudo. Área de estudo: DEM. Área de Estudo 2: Imagem de polarização L-HH FBD/PALSAR.

3. CONJUNTO DE DADOS

3.1 Imagens SAR

Para a realização deste trabalho foram utilizadas três imagens oriundas do sensor PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*) do satélite japonês ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), uma imagem do sensor ASAR (*Advanced Synthetic-Aperture Radar*) do satélite europeu ENVISAT (*European Environmental Satellite*), duas imagens do satélite canadense RADARSAT-2 e uma imagem do satélite alemão TerraSAR-X. Estas imagens foram adquiridas em diferentes configurações de azimute de visada, ângulo de incidência, frequência e datas. Foram utilizadas imagens SAR de polarização paralela horizontal (HH). Na tabela 1 são apresentadas as principais características deste conjunto de imagens.

As imagens PALSAR foram fornecidas pela JAXA, dentro do programa ALOS AO (*ALOS Announcement of Opportunity*), a partir da proposta ALOS RA# 219. A cena ASAR foi cedida pelo programa *International Charter and Major Disasters* (Charter ID 235). Já as imagens RADARSAT-2 e TerraSAR-X foram gentilmente

cedidas pelas empresas MDA GSI e Infoterra GmbH, respectivamente.

3.1 Dados cartográficos

A base de dados cartográficos utilizada neste trabalho corresponde ao mapeamento temático digital do estado de Santa Catarina de escala 1:50.000 (GEOAMBIENTE, FATMA/PPMA-SC; 2008). Desta base de dados cartográficos foram utilizadas informações planimétricas e altimétricas nas etapas de correção geométrica (ortorretificação) e avaliação planimétrica das ortomagens SAR. Os dados de mapeamento de uso e cobertura do solo foram utilizados durante a análise das áreas inundadas.

4. ABORDAGEM METODOLÓGICA

4.1 Pré-processamento das imagens SAR

Esta etapa refere-se às atividades de filtragem para redução do ruído *speckle*, conversão dos números digitais (DN) para coeficientes de retroespalhamento (σ^0), correção geométrica e avaliação planimétrica.

Para a redução do ruído *speckle* foi utilizado o filtro adaptativo *Enhanced-Frost* com janela 3×3

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DAS IMAGENS SAR UTILIZADAS

| Sensor (Satélite) | Modo | Produto | Data | Azimute de Visada (Órbita) | Ângulo de Incidência | Resolução Espacial (Rg. x Az) m. |
|----------------------|---------------|---------|------------|----------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| PALSAR-ALOS | FBD | 1.5 | 14/09/2008 | 78° - Ascendente | 38,9° | 10,7 × 4,5 |
| | | | 01/10/2008 | | | |
| ASAR-ENVISAT | IMP | IMP 1P | 27/11/2008 | 282° - Descendente | 33,7° | ~30 × 30 |
| RADARSAT-2 | Standard 5 | SGC | 28/11/2008 | 78° - Ascendente | 39,3° | 25 × 26 |
| | | | 30/11/2008 | 282° - Descendente | | |
| TerraSAR-X | Stripmap (SM) | MGD | 01/12/2008 | 78° - Ascendente | 28,7° | 2,98 × 3,05 |
| PALSAR-ALOS | FBS | 1.5 | 30/01/2009 | 78° - Ascendente | 38,9° | 5,4 × 4,5 |

nas imagens de maior resolução espacial (SM/TerraSAR-X e FBS/PALSAR) e 5×5 nas imagens de média resolução espacial (FBD/PALSAR, ASAR, Standard-5 do RADARSAT-2).

A transformação para valores de σ^0 das imagens SAR é necessária para ajustar para a superfície imageada, a quantidade de energia eletromagnética refletida por uma célula de resolução do sensor. Neste sentido, para as imagens ASAR e Standard-5 do RADARSAT-2 esta transformação foi realizada por meio do algoritmo Sarsigm (PCI Geomatics Enterprise Inc., 2010), sendo gerada uma imagem calibrada para valores de coeficiente de retroespalhamento a partir de informações do ganho, *off-set* e de ângulos de incidência contidos nos metadados de cada cena. Para a obtenção dos valores de σ^0 das imagens do sensor PALSAR, modos FBD e FBS, foi utilizada a equação apresentada em Shimada et al., (2009):

$$\sigma^0 \text{ (dB)} = 10 * \log_{10}(\text{DN}^2) + \text{CF} \quad (1)$$

na qual CF representa o fator de conversão e DN é o valor digital da imagem em amplitude. Para as imagens FBD de polarização HH, adquiridas antes de 8 de janeiro de 2009, o valor de CF foi de -83,2. Para a imagem FBS de polarização HH, adquirida posterior a 9 de janeiro de 2009 o valor de CF foi de -83,0 (JAXA, 2010). Os valores de σ^0 para a imagem SM/TerraSAR-X foram obtidos por meio da equação descrita em Fritz et al., (2010):

$$\sigma^0 = (k_s * |\text{DN}|^2 - \text{NENB}) * \text{sen}\theta \quad (2)$$

na qual k_s é o fator de calibração fornecido nos metadados da cena, DN é o valor digital da imagem em amplitude, NENB corresponde ao ruído

equivalente a β^0 (*Noise Equivalent Beta Naught*), e θ é o ângulo de incidência.

Devido ao relevo montanhoso da área em estudo foi necessário realizar a correção geométrica rigorosa (ortorretificação) deste conjunto de dados SAR. Deste modo, todas as imagens SAR foram ortorretificadas por meio da modelagem *Radar Specific* disponível no software *PCI Geomatica OrthoEngine*. A modelagem *Radar Specific* utiliza a equação *Ranger Doppler* e aproveita ao máximo as informações do posicionamento do satélite e do sensor, diminuindo assim a necessidade de um grande número de pontos de controle (*Ground Control Points – GCPs*) necessários para a correção geométrica das imagens. Esta modelagem foi aplicada com o uso de GCPs extraídos da base cartográfica digital de escala de 1:50.000. Para a ortorretificação da imagem SM/TerraSAR-X foram utilizados 8 GCPs e as demais imagens SAR foram ortorretificadas com o uso de 10 GCPs.

A precisão posicional das ortoimagens SAR foi avaliada a partir do cálculo do Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error - RMSE*) obtido pela comparação entre as coordenadas de pontos independentes de validação (*Independent Check Points - ICPs*) extraídos da base cartográfica de escala 1:50.000 com as coordenadas medidas nas ortoimagens SAR. Após esta avaliação, as ortoimagens foram reamostradas para um tamanho de pixel comum definido com base nos resultados da avaliação posicional (valores do RMSE).

4.2 Classificação e análise das áreas inundadas

Os procedimentos empregados para a realização da classificação foram: criação de uma máscara de relevo, aplicação do classificador ISODATA, remapeamento dos agrupamentos para as classes desejadas, rotulagem das classes,

transformação do mapa temático de formato *raster* para a representação vetorial e avaliação da classificação (Figura 2).

Devido à resposta de corpos d'água em imagens SAR ser similar às áreas de sombras radar, uma máscara de relevo foi elaborada para excluir os pixels localizados em áreas de relevo acidentado. Esta máscara foi criada a partir da informação de declividade derivada de um DEM (Modelo Digital de Elevação) de escala 1:50.000, gerado a partir das curvas de nível equidistantes 20 metros. Desta forma, apenas foram classificados os pixels das imagens SAR localizados em terrenos com declividade de até 8°, ou seja, áreas com relevo plano ou suavemente ondulado, conforme definido por EMBRAPA (1999).

A classificação das ortoimagens SAR em σ^0 foi realizada por meio do uso do classificador não supervisionado ISODATA. Este algoritmo foi selecionado por não requerer informações prévias de treinamento (como dados de campo), permitindo assim a atribuição de classes finais aos agrupamentos em etapa posterior. Este classificador possibilita um processamento rápido, condição muitas vezes necessária em situações de emergência como em desastres naturais.

A classificação ISODATA é realizada por meio do agrupamento de pixels segundo suas respostas espectrais, onde o processamento leva em consideração parâmetros de classificação como número de classes desejadas, número de interações, limiar de mudança entre outros (SCHOWENGERDT, 2007). O algoritmo ISOCLUS (*Isodata Clustering Program*) implementado no software PCI Geomatica versão 10.3 foi utilizado para a classificação. Neste

trabalho foram utilizados os valores de 20 para o número de interações, limiar de mudança de 0,01 e desvio padrão 10.

A definição do significado de cada agrupamento (*clusters*), durante o processo de remapeamento das classes (agregação dos *clusters*), foi realizada com base na análise exploratória dos valores de σ^0 e fotografias de campo obtidas durante o período de inundação. Assim, foram exploradas principalmente as os valores da intensidade do retroespalhamento para extrair as seguintes classes de interesse: corpos d'água pré-inundação, áreas inundadas e vegetação alagada (Figura 3), descritos com mais detalhes a seguir.

Em imagens SAR, corpos d'água sem influência de ventos ou correntezas apresentam os menores valores de retroespalhamento. Isto ocorre principalmente porque superfícies com água comportam-se como refletores especulares do sinal emitido pelo sensor SAR, o que resulta em baixos valores de retroespalhamento, ou seja, menores valores de nível de cinza. Este retroespalhamento especular contrasta com o retroespalhamento difuso (níveis de cinza médios) de superfícies emersas (LEWIS, 1998).

Neste trabalho, os corpos d'água classificados nas imagens adquiridas antes do desastre de 2008 (PALSAR modo FBD - *Fine Bean Dual*) correspondem principalmente às áreas de cultivo de arroz irrigado em período de plantio, quando estão cobertos por uma lâmina d'água (Figura 3a). Já os corpos d'água identificados nas imagens adquiridas durante o período do desastre (ASAR, Standard-5 do RADARSAT-2 e SM/TerraSAR-X), referem-se às áreas inundadas pelas fortes chuvas de 2008 (Figura 3b).

A classe vegetação alagada aqui definida, correspondeu principalmente às plantações de arroz irrigado que não foram totalmente submersa durante a inundação de 2008. Esta vegetação alagada foi identificada por meio da análise de áreas com elevado coeficiente de retroespalhamento nas imagens adquiridas durante e depois do evento de 2008 (Figura 3c). Pressupõe-se que essa resposta elevada resulte de contribuições de espalhamentos volumétrico e *double-bounce*, a qual se caracteriza principalmente pela interação entre a superfície d'água e do dossel da vegetação (WANG et al., 2009).

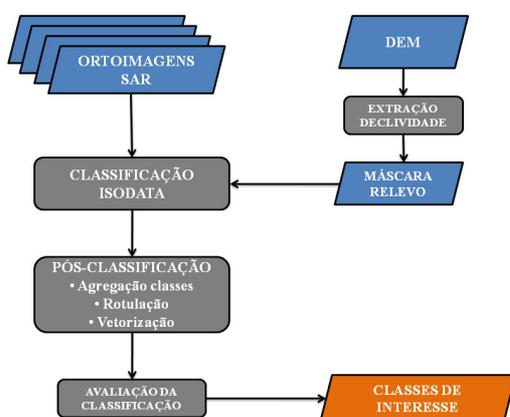


Fig. 2 – Fluxograma das etapas de classificação.

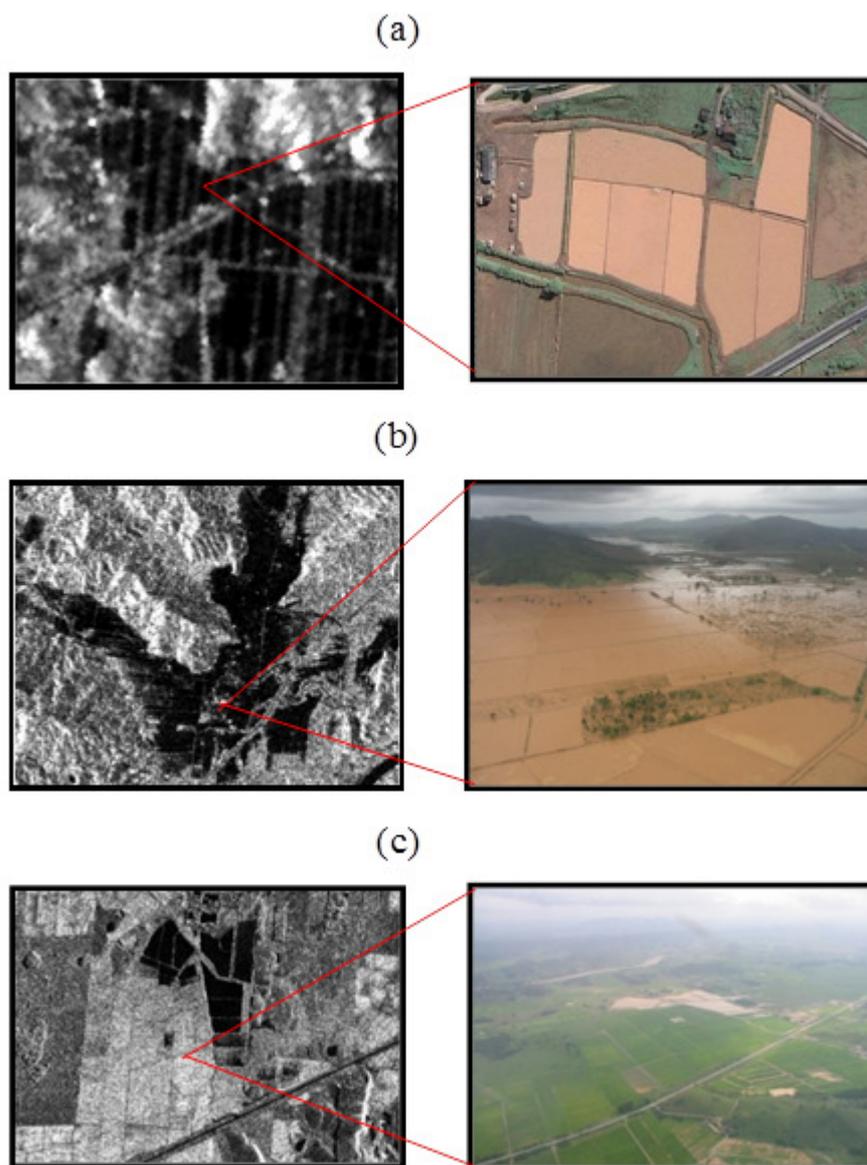


Fig. 3 – Classes de interesse: (a) Corpos d' água pré-inundação na imagem FBD/PALSAR (L-HH) de 14/09/2008; (b) inundação na imagem Standard-5 do RADARSAT-2 (C-HH) de 28/11/2008; (c) vegetação alagada na imagem SM/TerraSAR-X (X-HH) de 01/12/2008. Fotos: Joel Pellerin (2008).

Em muitos casos de inundação, não é possível a produção de um mapa detalhado e preciso com o registro espacial das áreas afetadas. Neste sentido, este trabalho não teve acesso a nenhum documento ou dados cartográficos auxiliares, que pudesse ser utilizados como referência no processo de validação dos resultados das classificações realizadas.

Considerando-se a necessidade de uma avaliação do desempenho da classificação, a acurácia do mapeamento foi realizada por meio de comparação das classificações de cada ortoimagem SAR com um conjunto pontos de referência, distribuídos aleatoriamente sobre cada ortoimagem. Estes pontos foram produzidos a partir da

interpretação visual de um especialista em imagens SAR, sem que este tivesse contato prévio com os resultados das classificações. Assim, foi elaborada a matriz de confusão para análise da concordância dos resultados das classificações em relação aos dados de referência. Através de cada matriz de confusão foram calculadas medidas descritivas como, exatidão global, exatidão do usuário, exatidão do produtor, e o índice *Kappa*.

Por fim, a dinâmica temporal da inundação foi obtida por meio da análise da variabilidade das áreas inundadas e com vegetação alagada, em relação aos dados de precipitação observada na

estação pluviométrica de Blumenau (ANA, 2009) durante o período de aquisição das imagens SAR pelos satélites.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação planimétrica e análise do coeficiente de retroespalhamento (σ^0)

Os valores de RMSE das ortoimagens SAR são apresentados na tabela 2 por meio das estimativas nas componentes E, N e total. Os valores da avaliação planimétrica demonstraram que a precisão das ortoimagens para os sensores de média resolução espacial (FBD/PALSAR, ASAR e Standard-5 do RADARSAT-2) variaram entre 22 e 28 metros. Já para as imagens de alta resolução espacial (SM/TerraSAR-X e FBS/PALSAR) os valores de RMSE variaram de 5 a 9 metros. Estes resultados de RMSE serviram de orientação para a determinação do tamanho dos pixels das ortoimagens na classificação. Neste sentido, foi definido um espaçamento comum de 25 e 7 metros para as ortoimagens de média e alta resolução espacial, respectivamente.

A análise exploratória do coeficiente de retroespalhamento (σ^0) possibilitou caracterizar a resposta das classes corpos d'água pré-inundação, inundação e vegetação alagada (Figura 4). De modo geral, os menores valores de σ^0 foram obtidos para a classe de corpos d'água (pré-inundação e inundação). Já os maiores valores de σ^0 foram extraídos das amostras sobre áreas com vegetação alagada. Estes resultados foram utilizados como referência para a etapa de remapeamento dos agrupamentos produzido na classificação ISODATA.

TABELA 2 – ACURÁCIA PLANIMÉTRICA DAS ORTOIMAGENS SAR.

| ORTOIMAGEM | E | N | RMSE (TOTAL) | Num. ICPs |
|--------------------------|-------|-------|--------------|-----------|
| FBD/PALSAR | 11,24 | 19,06 | 22,13 | 30 |
| ASAR | 20,81 | 19,92 | 28,81 | 27 |
| RADARSAT-2 28/11/2008 | 17,03 | 17,27 | 24,26 | 27 |
| RADARSAT-2 30/11/2008 | 19,82 | 17,83 | 26,66 | 20 |
| SM/TerraSAR-X | 4,11 | 4,08 | 5,79 | 20 |
| FBS/PALSAR | 7,14 | 6,03 | 9,35 | 22 |

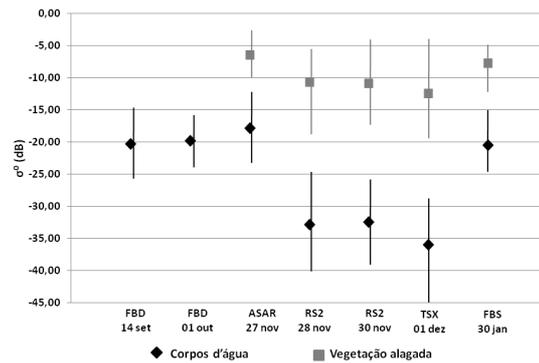


Fig. 4 – Valores de σ^0 (dB) obtidos para as classes de interesse. RS2= RADARSAT-2; TSX=TerraSAR-X

5.2 Dinâmica temporal da inundação sobre a região de Gaspar-SC

Através do conjunto de imagens SAR disponível para este trabalho, foi possível realizar um monitoramento da inundação sobre a região entre o Ribeirão Gaspar e Ribeirão Poço Grande, no município de Gaspar (Área de estudo 1). A variação temporal de corpos d'água e de vegetação alagada, observadas antes, durante e depois das fortes chuvas de 2008 é apresentada na figura 5.

Na Figura 5a são apresentados os dados extraídos da imagem FBD/PALSAR, com data de aquisição antes da inundação de 2008. Com esta informação foi possível obter uma visualização da distribuição dos principais corpos d'água antes das fortes chuvas de novembro de 2008.

Durante o período do desastre, quatro imagens SAR foram adquiridas em diferentes datas. A primeira imagem adquirida após as fortes chuvas corresponde à imagem ASAR (Figura 5b) do dia 27 de novembro. Esta imagem evidencia áreas inundadas resultantes de um acumulado superior a 570 mm de precipitação registrada na estação pluviométrica de Blumenau, entre os dias 22 a 27 de novembro de 2008, correspondendo ao período do início da situação de emergência e da aquisição da imagem ASAR, respectivamente.

No dia 28 de novembro, foi adquirida a primeira imagem Standard-5 do RADARSAT-2 com órbita ascendente (Figura 5c). Entre o período de aquisição da imagem ASAR e desta imagem RADARSAT-2, houve uma redução das chuvas. Desta forma pode-se perceber a diminuição das

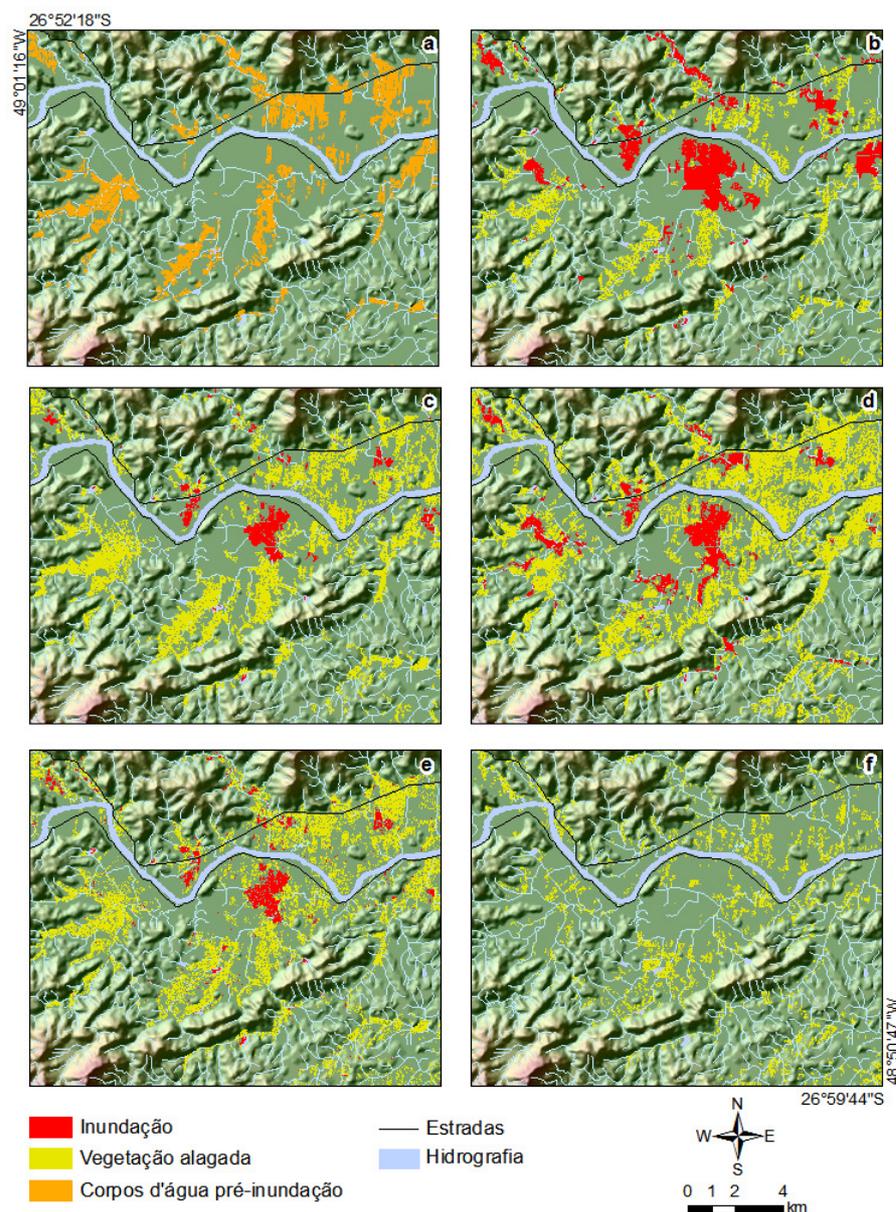


Fig. 5 – Sequência temporal dos corpos d'água e de vegetação alagada, detectados pelos diferentes sensores SAR.

manchas de inundação e um aumento das áreas de vegetação alagada, o que pode estar relacionado com o escoamento das águas nestas áreas.

A imagem Standard-5 do RADARSAT-2 com órbita descendente (Figura 5d) foi obtida no dia 30 de novembro. Entre o período da imagem do dia 28 de novembro e a aquisição desta (no dia 30 de novembro), foram registrados 82 mm de precipitação. Este volume de chuva ocasionou um aumento das manchas de inundação e a expansão das áreas de vegetação alagada. Esta informação evidencia a pouca capacidade do terreno em permitir o escoamento das águas.

A última imagem do período de desastre corresponde a imagem do satélite TerraSAR-X, com

data de aquisição em 01 de dezembro de 2008, nove dias após o início da situação de emergência (Figura 5e). Mais uma vez, com a diminuição das chuvas foi possível observar a redução da grande mancha de inundação na margem direita do Rio Itajaí-açu e a permanência de outras manchas de inundação de menor dimensão.

A imagem SAR adquirida após o desastre de 2008 correspondeu a uma cena do sensor PALSAR, modo FBS, adquirida no dia 30 de janeiro de 2009 (Figura 5f). O tempo decorrido entre a última imagem adquirida no período de desastre (imagem Stripmap TerraSAR-X) e a aquisição desta cena, foi de 60 dias, não sendo registradas fortes chuvas durante este intervalo. Nesta imagem é possível

observar a ausência de corpos d'água, tanto sobre as áreas de arroz irrigado, como sobre as áreas inundadas detectadas ao longo do período do desastre. A vegetação alagada detectada nesta data corresponde aos campos de arroz irrigado, remanescentes ao desastre de 2008, já em período de colheita.

Com as imagens adquiridas durante o período de desastre, foi possível registrar e mensurar a variabilidade espacial das manchas de inundação e de vegetação alagada em função da quantidade de chuva sobre esta área de estudo. Os gráficos nas figuras 6 e 7 apresentam os valores de precipitação acumulada, de área inundada e vegetação alagada entre os dias 22 de novembro a 01 de dezembro de 2008.

Pode-se observar na Figura 6 que a maior área inundada foi detectada pela imagem ASAR adquirida no dia 27 de novembro, três dias após as fortes chuvas dos dias 22 a 24 de novembro. Fica evidente ainda um aumento da área inundada entre os dias 28 e 30 de novembro, devido a forte precipitação ocorrida neste período (82 mm).

Por outro lado, a maior área de vegetação alagada (Figura 7) foi detectada no dia 28 de novembro pela imagem Standard-5 do RADARSAT-2, sendo observada também a influência da quantidade de chuva sobre a área de vegetação alagada estimada pela imagem do dia 30 de novembro.

Neste sentido foi observado que, a variação no tamanho das manchas de inundação e nas áreas de vegetação alagada, ao longo do período de desastre, foi fortemente afetada pelo volume de chuvas que atingiu a região. Estes resultados demonstram o grande potencial o uso de sensores

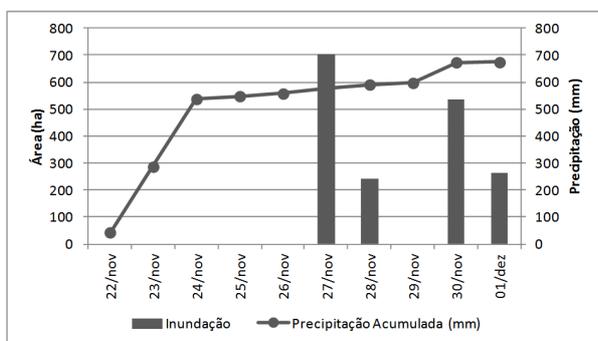


Fig. 6 – Área ocupada por manchas de inundação detectada pelos diferentes sensores SAR e quantidade de chuva acumulada.

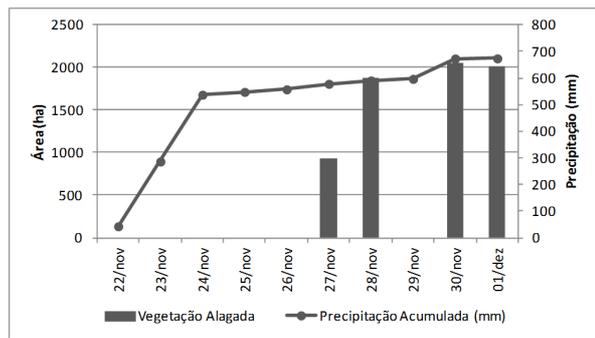


Fig. 7 – Área ocupada por vegetação alagada detectada pelos diferentes sensores SAR e quantidade de chuva acumulada.

SAR orbitais para a detecção e monitoramento de áreas inundadas e de vegetação alagada, resultantes de eventos de fortes chuvas, como as que ocorreram no estado de Santa Catarina em novembro de 2008.

5.3 A inundação mapeada sobre o Vale do Itajaí

Utilizando as imagens FBD/PALSAR, adquiridas em 14 de setembro e 01 de outubro de 2008, foi possível identificar os principais corpos d'água existentes sobre a região do médio e baixo Vale do Itajaí antes das fortes chuvas de 2008. Estes corpos d'água pré-inundação, apresentados na figura 8, correspondem às áreas de arroz irrigado em período de plantio, que ocupavam uma área estimada em 51.278 km². Os principais cursos d'água, como por exemplo, o canal do rio Itajaí-

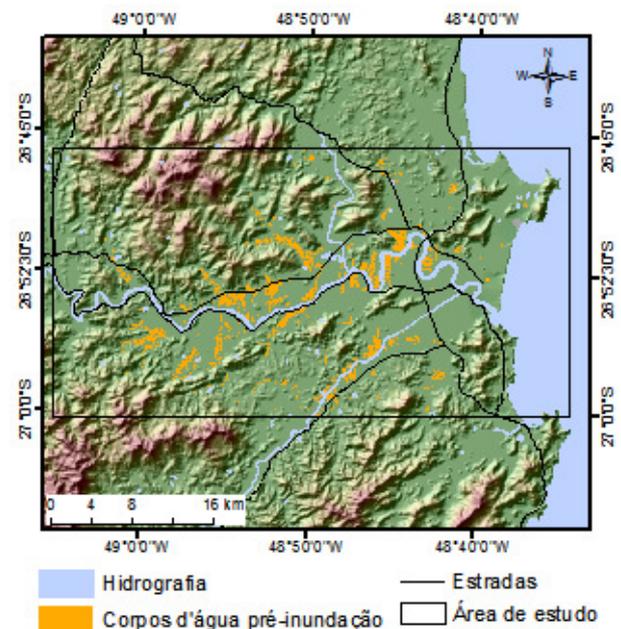


Fig. 8 – Mapa com a distribuição dos principais corpos d'água pré-inundação.

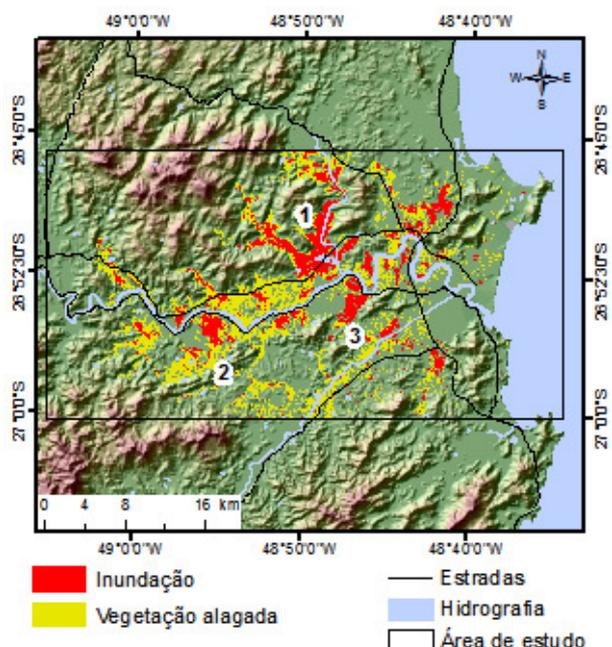


Fig. 9 – Áreas inundadas e de vegetação alagada detectada pelos diferentes sensores SAR durante o período de 27/11 a 01/12/2008.

açu, Itajaí mirim e o rio Luis Alves, foram extraídos dos dados planimétricos de escala 1:50.000.

A figura 9 apresenta o resultado integrado da classificação das áreas inundadas e das áreas com vegetação alagada, detectada pelos diferentes sensores SAR entre o período de 27 de novembro a 01 de dezembro de 2008. As áreas inundadas foram mapeadas ao longo das planícies localizadas nas margens esquerda e direita do rio Itajaí-açu. A maior mancha de inundação foi detectada sobre a região do baixo curso do rio Luis Alves, no município de Ilhota, conforme indicado com o número 1 na figura 9. Destacam-se também as manchas de inundações mapeadas na margem direita do rio Itajaí-açu, como a que ocorreu próximo da cidade de Gaspar (número 2 na figura 9) e no Córrego Espinheiro, no município de Ilhota (número 3 na figura 9).

A área de terrenos inundados, detectados pelos diferentes sensores SAR, correspondeu a aproximadamente 69.056 km². Segundo o mapeamento de uso do solo e da cobertura vegetal realizado por GEOAMBIENTE, FATMA/PPMA-SC (2008), 91% das áreas afetadas pela inundação eram destinadas para fins agrícolas e 7,5% eram áreas de pastagens ou campos naturais. Estas áreas afetadas possuíam grande parte de seu uso do solo com predomínio para o cultivo de arroz irrigado,

sobre terrenos planos e de baixa declividade. Com o advento da inundação causado pela grande volume de chuva, as águas ultrapassaram os diques de arroz irrigado, que se expandiram para áreas de relevo suavemente ondulado. Dessa forma, além das condições meteorológicas que propiciaram as fortes chuvas, as condições do ambiente como relevo, declividade, tipo de uso e cobertura do solo podem ter potencializado o evento, conforme observado por Tachini (2009).

Foi observado que o relevo muito plano da região, a prática da rizicultura em conjunto com eventos de fortes chuvas, torna as planícies do rio Itajaí-açu, à jusante da cidade de Blumenau, uma área bastante vulnerável a eventos de inundações. Desta forma, esta informação deve ser levada em consideração sobre o planejamento de uso do solo nessas áreas com grande vulnerabilidade a inundações.

Na avaliação dos resultados das classificações, a acurácia global apresentou valores iguais ou superiores a 90% para todas as ortoimagens. Já o índice kappa, variou entre 0,77 a 0,88 conforme os dados apresentado na Tabela 3.

Nas imagens FBD/PALSAR foram avaliadas apenas duas classes, corpos d'água e não água. O desempenho da classificação da imagem adquirida em setembro foi relativamente melhor do que a classificação da imagem com aquisição em outubro. Isto pode estar relacionado à maior confusão ocorrida na classificação de corpos d'água como não água na imagem adquirida em outubro.

Nas imagens adquiridas durante e posterior ao evento de 2008, foram avaliadas o resultado da classificação de três classes: água, não água e vegetação alagada. O melhor desempenho da exatidão global e do índice kappa foi observado na classificação da ortoimagem ASAR. As demais classificações (RARADSAT-2, SM/TSX e FBS/PALSAR) exibiram desempenhos dos índices kappa e exatidão globais muito próximos.

Os resultados da acurácia do produtor e do usuário são apresentados na Tabela 4 e 5. Os valores de exatidão do produtor (Tabela 4) mostram uma variação de 71% a 100% para a classe água, e de 79% a 94% para a classe vegetação alagada. Já os valores de acurácia do usuário mostraram variações entre 73% e 100% em relação à classe água, e de 68% a 88% para a classe vegetação alagada.

TABELA 3 – ACURÁCIA GLOBAL E ÍNDICE KAPPA DAS CLASSIFICAÇÕES

| ORTOIMAGEM CLASSIFICADA | ACURÁCIA GLOBAL (%) | KAPPA |
|------------------------------------|----------------------------|--------------|
| FBD/PALSAR 14/09/2008 | 95 | 0,88 |
| FBD/PALSAR 01/10/2008 | 90 | 0,77 |
| ASAR | 95 | 0,86 |
| RADARSAT-2 28/11/2008 | 91 | 0,79 |
| RADARSAT-2 30/11/2008 | 92 | 0,8 |
| SM/TerraSAR-X | 90 | 0,78 |
| FBS/PALSAR | 90 | 0,77 |

TABELA 4 - EXATIDÃO DO PRODUTOR (%) PARA AS CLASSIFICAÇÕES REALIZADAS

| ORTOIMAGEM | ÁGUA | NÃO ÁGUA | VEGETAÇÃO ALAGADA |
|----------------------------------|-------------|-----------------|------------------------------|
| FBD/PALSAR 14/09/2008 | 100 | 93 | - |
| FBD/PALSAR 01/10/2008 | 100 | 86 | - |
| ASAR | 100 | 79 | 84 |
| RADARSAT-2 28/11/2008 | 74 | 94 | 73 |
| RADARSAT-2 30/11/2008 | 71 | 92 | 73 |
| SM/TerraSAR-X | 92 | 88 | 85 |
| FBS/PALSAR | 83 | 85 | 92 |

Conforme observado, os maiores erros de omissão (relacionado à exatidão do produtor) ocorreram nas classes água e vegetação das imagens RADARSAT-2. Por outro lado, o maior erro de inclusão (relacionado à exatidão do usuário) na classe água foi observado para a imagem FBD PALSAR de 01/10/2008. Já para a classe vegetação alagada, a imagem RADARSAT-2 de 28/11/2008 apresentou o maior erro de inclusão.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho buscou demonstrar que imagens SAR em abordagem multitemporal adquiridas em diferentes frequências (bandas X, C e L), resoluções

espaciais, geometria de imageamento (azimutes de visada e ângulos de incidência), são valiosas no mapeamento de áreas afetadas por inundações através de classificação temática.

Ressalta-se, neste sentido, a importância da correção geométrica rigorosa dos dados SAR para geração de informação de localização com qualidade, e para permitir estabelecer de modo adequado o espaçamento de pixel comum, fundamental na comparação entre respostas dos vários sistemas para os mesmos locais no terreno.

A utilização do algoritmo de classificação não supervisionado ISODATA permitiu classificar as ortoimagens com rapidez e acurácia, com

TABELA 5 - EXATIDÃO DO USUÁRIO (%) PARA AS CLASSIFICAÇÕES REALIZADAS

| ORTOIMAGEM | ÁGUA | NÃO ÁGUA | VEGETAÇÃO ALAGADA |
|----------------------|------------|------------|-------------------|
| FBD/PALSAR | 85 | 100 | - |
| 14/09/2008 | | | |
| FBD/PALSAR | 73 | 100 | - |
| 01/10/2008 | | | |
| ASAR | 85 | 79 | 97 |
| RADARSAT-2 | 100 | 76 | 69 |
| 28/11/2008 | | | |
| RADARSAT-2 | 91 | 68 | 79 |
| 30/11/2008 | | | |
| SM/TerraSAR-X | 100 | 83 | 85 |
| FBS/PALSAR | 100 | 88 | 78 |

perspectivas reais de uso operacional em aplicações similares. O emprego da máscara de relevo contribuiu para evitar a inclusão de áreas de sombras de relevo na classificação das áreas inundadas.

A análise de dados multitemporais sobre a região de Gaspar permitiu identificar a influência da quantidade de chuvas sobre uma das regiões mais afetadas pelo desastre de 2008. Este tipo de resultado pode indicar terrenos com maior dificuldade de escoamento, devido a maior permanência da inundação sobre estas áreas.

O fator temporal possui grande influência na capacidade de detec o das áreas inundadas, desta forma, durante a ocorrência de desastres naturais recomenda-se a aquisi o de imagens SAR o mais próximo do pico de chuvas e durante um período de aproximadamente sete dias após o pico de inunda o.

Em eventos de desastres naturais resultante de fortes chuvas, o monitoramento da dinâmica de inunda o utilizando imagens SAR pode ser acompanhado tanto pela detec o de manchas de inunda o, como pela análise das áreas de vegeta o alagada.

De acordo com os índices de acurácia obtidos na classifica o das ortoimagens SAR, a abordagem de mapeamento das áreas inundadas se mostrou adequada para a caracteriza o do evento de inunda o ocorrido em 2008 no Vale do Itajaí.

Para a utiliza o de imagens SAR para estes fins, ressalta-se a necessidade da defini o de uma

configura o adequada de geometria de imageamento para a aquisi o das imagens. Neste sentido, deve-se levar em considera o o tipo de relevo e ambiente afetado (plano, montanhoso, rural ou urbano), geometria de aquisi o (azimute de visada e ângulo de incidência) e suas implica es no retroespalhamento; além do compromisso entre resolu o espacial e o tamanho da cena imageada (análise regional ou local).

Por fim, em situa es de emergência o uso de imagens SAR oferece vantagens em rela o aos sensores ópticos, por serem independentes de condi es atmosféricas e de ilumina o solar. Isto realça a importância do uso deste tipo de dado em a es operacionais da Defesa Civil e de outras institui es para o atendimento de áreas afetadas por inunda o e na avalia o de prejuízos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio financeiro, a MDA Geospatial Services Inc. (MDA GSI), a Infoterra GmbH, pelo fornecimento das imagens Standard-5 do RADARSAT-2 e TerraSAR-X, respectivamente, ao professor da UFSC Dr. Joel Pellerin, por ceder material fotográfico utilizado neste trabalho, e a Funda o do Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina (FATMA) pela cessão do mapeamento temático digital do estado de SC. Os autores gostariam de agradecer aos revisores por suas críticas e sugestões que ajudaram a melhorar a qualidade deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Hidroweb – Banco de dados Hidrológicos**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em 15 outubro 2009.
- BADJI, M.; DAUTREBANDE, S. Characterization of flood inundated areas and delineation of poor drainage soil using ers-1 SAR imagery. **Hydrological Processes**, v. 11, p. 1441-1450, 1997.
- BATES, P. D.; WILSON, M. D.; HORRITT, M. S.; MASON, D. C.; HOLDEN, N.; CURRIE, A. Reach scale floodplain inundation dynamics observed using airborne synthetic aperture radar imagery: data analysis and modelling. **Journal of Hydrology**, v. 328, p. 306- 318, 2006.
- DEPARTAMENTO ESTADUAL DE DEFESA CIVIL DE SANTA CATARINA (DEDC-SC) – **Relatório de Ações Enchentes em Santa Catarina**. Disponível em: <http://www.defesacivil.sc.gov.br/images/stories/relatorio_01_12_.doc> Acesso em: 09 agosto 2009.
- EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999. 412p.
- FRITZ, T. **TerraSAR-X Ground Segment Level 1b Product Format Specification (10.12.2007)**. Disponível em: <http://www.dlr.de/tsx/documentation/TX-GS-DD-3307_Level-1b-Product-Format-Specification_1.3.pdf> Acesso em: 17 maio 2010.
- GEOAMBIENTE, FATMA/PPMA-SC. **Mapeamento Temático Geral do Estado de Santa Catarina**. Relatório Técnico: GEO-RLT-C0715-33608-01. Florianópolis, 2008. 90p.
- GILLESPIE, T. W.; CHU, J.; FRANKENBERG, E.; THOMAS, D; Assessment and prediction of natural hazards from satellite imagery. **Progress in Physical Geography**, v. 31, n. 5, p. 459-70, 2007.
- JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). **PALSAR Calibration Factor Updated**. Disponível em: <<https://auig.eoc.jaxa.jp/auigs/en/doc/na/20090109en3.htm>> Acesso em 06 abril 2010.
- JOYCE, K. E.; BELLISS, S. E.; V, S.; MCNEILL, S. J.; GLASSEY, P. J. A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters. **Progress in Physical Geography** v. 33, n. 2, p. 183-207, 2009.
- LEWIS, ANTHONY J. Geomorphic and Hydrologic Applications of Active Microwave Remote Sensing. In: HENDERSON, F.M.; LEWIS, A. J. **Manual of remote sensing v. 2 Principles and applications of imaging radar**. New York, NY: John Wiley & Sons, 1998. p. 567-629
- PARADELLA, W. R.; SANTOS, A. R.; VENEZIANI, P.; CUNHA, E. S. Radares Imageadores nas Geociências: Estado da Arte e Perspectivas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 1, p. 56-62, 2005.
- PCI GEOMATICS. **Geomatica OrthoEngine, version.10.3**. Ontario, Canada: PCI Geomatics Enterprises Inc., Richmond Hill Ontario, 2010. 179 p. User Guide.
- PINHEIRO, ADILSON. Hidrologia. In: **Bacia do Itajaí: Aspectos Físicos e Biológicos**. Organizadores: AUMOND, J. J.; PINHEIRO, A.; FRANK, B. Blumenau: Edifurb, 2003. p. 92-115
- PULVIRENTI, L.; CHINI, M.; PIERDICCA, N.; GUERRIERO, L.; FERRAZZOLI, P. Flood monitoring using multi-temporal COSMO-SkyMed data: Image segmentation and signature interpretation. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n.4, p. 990-1002, 2011.
- SCHOWENGERDT, ROBERT A. **Remote sensing models and methods for image processing**. ed. 3. Burlington, MA: Academic Press, 2007. 515 p.
- SEVERO, DIRCEU LUIS. A meteorologia do desastre. In: **Desastre de 2008 no Vale do Itajaí. Água, gente e política**. Organizadores: BEATE FRANK E LUCIA SEVEGNANI - Blumenau: Agência de Água do Vale do Itajaí, 2009. p. 71-77
- SHIMADA, M.; ISOGUCHI, O.; TADONO, T.; ISONO, K. PALSAR Radiometric and Geometric

Calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.47, p. 3915-3932, 2009.

SILVA, H. S.; SEVERO, D. L. Clima. In: **Bacia do Itajaí: Aspectos Físicos e Biológicos**. Organizadores: AUMOND, J. J.; PINHEIRO, A.; FRANK, B. Blumenau: Edifurb, 2003. p. 78-89

TOMINAGA, LÍDIA K. Escorregamentos. In: **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. Organizadores: TOMINAGA, LÍDIA K.

SANTORO, JAIRO; AMARAL, ROSANGELA. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

WANG, C.; WU, J.; ZHANG, Y.; PAN, G.; QI, J.; SALAS, W. A. Characterizing L-Band Scattering of Paddy Rice in Southeast China With Radiative Transfer Model and Multitemporal ALOS/PALSAR Imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 4, p. 988-998, 2009.