



Revista Brasileira de Cartografia (2017), Nº 69/9: 1687-1709
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE DE BACIAS HIDROGRÁFICAS AO DESENVOLVIMENTO DE INUNDAÇÕES POR INTEGRAÇÃO DE DADOS FISIAGRÁFICOS E SENSORIAMENTO REMOTO POR RADAR

*Evaluation of Flooding Susceptibility in Watersheds by Merging Physiographic
and Radar Remote Sensing Data*

**Isabela Habib Canaan da Silva¹, Fernando Pellon de Miranda²
& Luiz Landau³**

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
Faculdade de Formação de Professores, Departamento de Geografia
Rua Dr. Francisco Portela, 1470, Patronato, 24435005 - Sao Goncalo, RJ - Brasil
isabelahabib@yahoo.com.br

2 Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ
Programa de Engenharia Civil, LabSAR - COPPE/UFRJ
Centro de Tecnologia, Bloco I 114. Cidade Universitária. Ilha do Fundão. CEP: 2194900 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
pallon@labsar.coppe.ufrj.br

3 Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ
Programa de Engenharia Civil, LAMCE - COPPE/UFRJ
Centro de Tecnologia, Bloco I 214. Cidade Universitária. Ilha do Fundão. CEP: 2194900 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
landau@lamce.com.br

Recebido em 29 de Maio, 2016/ Aceito em 3 de Agosto, 2017
Received on May 29, 2016/ Accepted on August 3, 2017

RESUMO

A pesquisa propõe uma metodologia para a avaliação da suscetibilidade bacias hidrográficas ao desenvolvimento de inundações por integração de dados fisiográficos e de sensoriamento remoto por radar. Foram utilizadas imagens dos satélites RADARSAT- 2, dados de altimetria, hidrografia e pluviometria. A área de estudo abrange o entorno da cidade de Villahermosa, México, onde ocorrem inundações periódicas. A classificação textural foi utilizada para individualizar as classes de cobertura representativas de corpos d'água, floresta seca e vegetação inundada. Os dados de altimetria e hidrografia permitiram a construção de um MDT específico. A partir de tal produto, foi definida a bacia hidrográfica na qual a cidade está inserida e foi feita a análise geomorfológica da bacia e de suas sub-bacias. Os dados de precipitação provenientes de estações climatológicas foram associados à evolução da distribuição em superfície das áreas cobertas por corpos d'água e também foram analisados de acordo com seus valores extremos. A integração da análise do meio físico da bacia hidrográfica com aquela dos dados de precipitação permitiu a construção de uma matriz, a partir da mesma foi possível gerar um índice com diferentes níveis de susceptibilidade ao fenômeno de inundação. Através de ferramentas de análise espacial em ambiente SIG definiram-se áreas de perigo e por fim verificou-se o índice de risco com as imagens SAR utilizadas na pesquisa. De posse de tais resultados, foram feitas considerações para a melhor gestão da bacia hidrográfica.

Palavras-chave: Inundação, Bacia Hidrográfica, Dados Fisiográficos, RADAR.

ABSTRACT

The aim of this study is to conceive a methodology for assessing susceptibility to flooding in watersheds using physiographic and SAR remote sensing data. RADARSAT- 2 images were used in conjunction with altimetric, hydrographic and pluviometric data. The study area embraces the surroundings of Villahermosa city, Mexico, where there is periodic flooding. A textural classification was used to identify cover types representative of water bodies, dry forest and flooded vegetation. Altimetric and hydrography data allowed the construction of a DTM specific for the present research. This product was used to define the watershed that includes Villahermosa city and further submitted to geomorphological analysis. Precipitation data coming from climatological stations were then associated with the evolution in time of the water bodies area distribution and were also investigated the extreme values. The integration of physical environment of the watershed analysis and rainfall data allowed the construction of a matrix that generated the physiographic risk index to the development of flooding. From this index, a spatial analysis was made to identify areas that are prone to inundation. The proposed index was validated with the classification of RADARSAT images. Based on these results, it was possible to make considerations for the better watershed management.

Keywords: Flooding, Watershed, SAR Remote Sensing, Physiographic Data.

1. INTRODUÇÃO

Na natureza, ocorrem diversos fenômenos que fazem parte da dinâmica terrestre e são responsáveis pela estruturação da paisagem. Quando estes acontecem ou se deslocam sobre um sistema social podem causar uma situação potencial de perigo a pessoas e bens. Neste caso, passam a ser considerados desastres (MARCELINO, 2007).

Rotuno Filho (2001) apresenta a bacia hidrográfica como um exemplo de ecossistema; logo, as relações entre a natureza e o homem devem ser consideradas em estudos hidrológicos. Na presente pesquisa, está em questão o recorrente e danoso fenômeno de inundação que ocorre na cidade de Villahermosa, México. Para analisar tal fenômeno, faz-se necessário estudar a dinâmica da bacia hidrográfica na qual a cidade está inserida.

As bacias hidrográficas em áreas costeiras apresentam uma particularidade geomorfológica que favorece o desenvolvimento de cheias: as cabeceiras e a maior área de captação encontram-se em terrenos do embasamento, com declividades elevadas a médias, enquanto que o restante da bacia está implantado sobre terrenos de planície costeira, com declividades baixas até nulas. Com isso, os rios de planície costeira recebem enorme volume de água proveniente das encostas, mas o coeficiente de escoamento diminui fortemente devido às baixas declividades e à ação de represamento das águas doces causadas pelas marés que adentram os canais estuarinos e lagunares (SOUZA, 2005).

Segundo Souza (1998), condicionantes de origem natural e/ou antrópica necessitam ser consideradas em estudos de inundações em regiões costeiras. No caso da cidade de Villahermosa, que está localizada em uma zona costeira tropical, deve-se levar em conta a magnitude e a frequência de chuvas, a morfometria da bacia de drenagem, assim como o uso e a cobertura do solo, a influência das marés, a ocupação das áreas marginais aos canais de drenagem e até mesmo a modificação dos canais para a construção de estruturas artificiais.

Por isso, é de extrema importância o desenvolvimento de modelos na formulação de planos de emergência voltados para o risco de inundação. Neste contexto, as geotecnologias, principalmente o sensoriamento remoto, tornam-se importantes ferramentas de suporte ao estudo das inundações, uma vez que permitem o rápido e preciso imageamento de extensas regiões, como também a realização de análises geográficas através da manipulação digital dos dados georreferenciados (MARCELINO, 2007).

Assim, o objetivo geral da pesquisa é propor uma metodologia para avaliar a suscetibilidade ao desenvolvimento de inundações em zonas costeiras tropicais, utilizando o sensoriamento remoto por radar e dados fisiográficos em ambiente SIG (sistemas de informações geográficas).

As características pluviométricas locais justificam o uso do sensoriamento remoto por radar. A média de precipitação da Região Hidrológica Grijalva-Usumacinta é a maior do

país, o Diário Oficial da Federação (2010) conclui que a localização geográfica da região é um importante fator para a intensa precipitação, pois, em aproximadamente 83% do ano, predominam chuvas fortes e longas. A precipitação média anual é de 2.147 mm. Na costa do Golfo do México, os valores se situam entre 1.700 mm e 4.000 mm. No sopé da Serra de Chiapas, juntamente com grande parte de Tabasco, encontram-se os níveis mais altos (4.500 mm). Como a relação da precipitação com a cobertura de nuvens é direta, faz-se necessário o uso de sensores capazes de imagear através de tal obstáculo.

Dentre os objetivos específicos da pesquisa, pode-se destacar a identificação de superfícies totalmente cobertas por água e de vegetação inundada no entorno da Cidade de Villahermosa, através da classificação de imagens SAR; a elaboração de um diagnóstico da suscetibilidade do meio físico a inundações na Bacia Grijalva-Villahermosa; um método de avaliação desse tipo de risco ambiental, estabelecendo graus de suscetibilidade de bacias de drenagem ao desenvolvimento de inundações; o índice de risco ao fenômeno de inundação; por fim, a validação do método com os resultados obtidos na classificação das imagens SAR.

Os satélites RADARSAT-1 e 2 permitem o eficiente monitoramento de regiões cobertas por nuvens, uma vez que a aquisição dos dados de radar em geral independe de condições atmosféricas. Além disso, sob certas condições, o pulso SAR (Synthetic Aperture Radar) é capaz de penetrar o dossel vegetal e detectar alagamento em terrenos florestados (PARADELLA *et al.*, 2005). Assim, é grande o potencial desses sistemas, para os quais a nebulosidade é praticamente transparente, em aplicações relacionadas ao fenômeno de inundação, uma vez que a relação das chuvas com a cobertura de nuvens é direta.

Nos dias atuais, verifica-se um aumento considerável na frequência e intensidade de inundações em zonas costeiras tropicais, assim como nos danos e prejuízos causados por esses desastres naturais. Embora as inundações tenham sua origem em fatores naturais, as intervenções antrópicas agravam tal fenômeno. A ocupação de planícies de inundação naturais e a impermeabilização dos solos urbanos são

ações que contribuem para agravar o impacto socioeconômico dos eventos de cheias.

Mapear áreas inundáveis é extremamente importante para o direcionamento das expansões urbanas, uma vez que, se dispendo do zoneamento desses locais, pode-se designá-los para usos adequados (FIGUEIREDO, 2003). Com efeito, os mapas de inundação podem subsidiar a reorganização do espaço urbano, uma vez que são úteis para o estabelecimento de novas diretrizes de ocupação em uma cidade (OLIVEIRA *et al.* 2010).

Muitos autores relacionam os parâmetros morfométricos da bacia de drenagem com suas características hidrológicas e, assim, avaliam sua suscetibilidade ao desenvolvimento de inundações. Entretanto, em geral, tais relações são investigadas isoladamente para cada parâmetro ou para poucos parâmetros.

A pesquisa de Horton (1945) sugere que a área, a declividade dos canais e a densidade de drenagem estão relacionadas com a ocorrência de inundações. Morisawa (1962) propõe que o escoamento superficial se dá em função principalmente da área da bacia, do comprimento total dos canais, da frequência dos canais de 1ª ordem, da declividade do canal principal, da circularidade da bacia e da taxa de relevo. Mais tarde, Acreman e Sinclair (1986) afirmaram que a área, o comprimento do canal principal, sua declividade e a densidade de drenagem são os fatores mais determinantes nos processos hidrológicos. De acordo com o estudo de Souza (2005), os parâmetros morfométricos que apresentam melhor relação quanto ao desencadeamento potencial de inundações são: ordem hierárquica da bacia; número e frequência de canais totais e de primeira ordem; tamanho da bacia (área e perímetro totais); comprimento do canal principal (ou da bacia); forma da bacia, fator forma e índice de circularidade; declividade do canal principal e declividade da bacia; densidade hidrográfica e densidade de drenagem; densidade de confluências e relação de bifurcação; taxa de relevo e rugosidade do relevo.

O presente trabalho apresenta um método mais completo e abrangente, que integra não só parâmetros morfométricos, mas também características de ordem física. Para se avaliar

a susceptibilidade ao desenvolvimento de inundações, são considerados dados históricos de precipitação e não apenas características hidrológicas do tempo presente. Além disso, integra-se a tecnologia de sensoriamento remoto por radar, o que permite a determinação das superfícies afetadas pelo fenômeno, podendo-se tanto calibrar o método como indicar zonas críticas para futuro monitoramento.

Em suma, considerando o atual estado da arte da temática de inundações, está sendo aqui proposta uma metodologia inovadora no contexto de diagnóstico ambiental de áreas de risco. Essa abordagem pode servir de guia para a implementação de políticas públicas de prevenção e mitigação de eventos críticos, assim como para o planejamento de infraestrutura de controle de cheias e de medidas não estruturais, como sistemas de alerta e planos de contingência.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo, inserida em território mexicano, corresponde ao entorno da cidade de Villahermosa, capital do Estado de Tabasco. Tal unidade federativa ocupa a porção meridional do Golfo do México, limitando-se a leste com o Estado de Campeche e com a República da Guatemala, a oeste com o Estado de Veracruz, a sul com o Estado de Chiapas e a norte com o mar (Figura 1).

2.1 Aspectos Hidrográficos

A área de estudo corresponde à Região Hidrológica Número 30, denominada Grijalva-Usumacinta, conforme a classificação usada pelo governo federal mexicano, através da Comissão Nacional da Água (Figura 1).

A Região Hidrológica Grijalva-Usumacinta consiste da união de duas grandes bacias hidrográficas: bacia binacional do Rio Grijalva e da bacia binacional do Rio Usumacinta. Esta grande região hidrológica se divide em seis sub-regiões:

1. Alto Grijalva ou Grijalva-La Concordia;
2. Medio Grijalva ou Grijalva-Tuxtla Gutiérrez;
3. Bajo Grijalva ou Grijalva-Villahermosa;
4. Rio Lacantún;
5. Rio Usumacinta;
6. Laguna de Términos.

Por abranger uma região bastante extensa para ser estudada, que inclui limites internacionais, optou-se por limitar a área de pesquisa à Sub-bacia Bajo Grijalva, também chamada de Bacia Grijalva-Villahermosa, considerando suas sub-bacias. Assim, a área selecionada corresponde a cerca de 25% do total da Região Hidrológica número 30. Tal decisão foi tomada tendo em vista a disponibilidade de séries históricas de imagens RADARSAT-2 apenas no entorno da área urbana e industrial inundável de Villahermosa, que está sujeita aos maiores danos relacionados a esse desastre natural.

2.2 Antecedentes Históricos

Desde a época pré-hispânica, a bacia hidrográfica Grijalva-Usumacinta ganhou destaque por sua rede fluvial e posição estratégica para o transporte de mercadorias.

Há indícios de que a planície costeira de Tabasco começou a ser ocupada pelos Mayas. Em seguida, de acordo com os antecedentes históricos relatados no Programa de Desenvolvimento Urbano da Zona Metropolitana de Villahermosa, foi estabelecido no local, em 1519, o primeiro assentamento espanhol na região, Villa de la Victoria (CASTILLO *et al.*, 2008). Em 1557, a população se deslocou ao longo do Rio Grijalva, constituindo uma nova área de povoamento, San Juan Bautista de Tabasco. Em 1958, tal núcleo passou a ser denominado Villahermosa de San Juan Bautista.

Villahermosa foi o primeiro centro comercial de Tabasco, em razão de suas vias de transporte marítimo e fluvial. Estas condições induziram o crescimento da população, que, em 1857, era de aproximadamente 5 500 habitantes.

Segundo relatos de Sánchez (2011), já no século XVIII, as fortes chuvas provocavam alagamentos em Villahermosa e comprometiam a produção agrícola de Tabasco. Em 1904, a construção de um canal de navegação agravou o problema das inundações. Além disso, nos últimos 50 anos, foram construídas quatro represas ao longo do Rio Grijalva, denominadas Malpaso, La Angostura, Chicoasén e Penitas, as quais influenciaram significativamente a ocorrência de uma grande inundação em 2007.

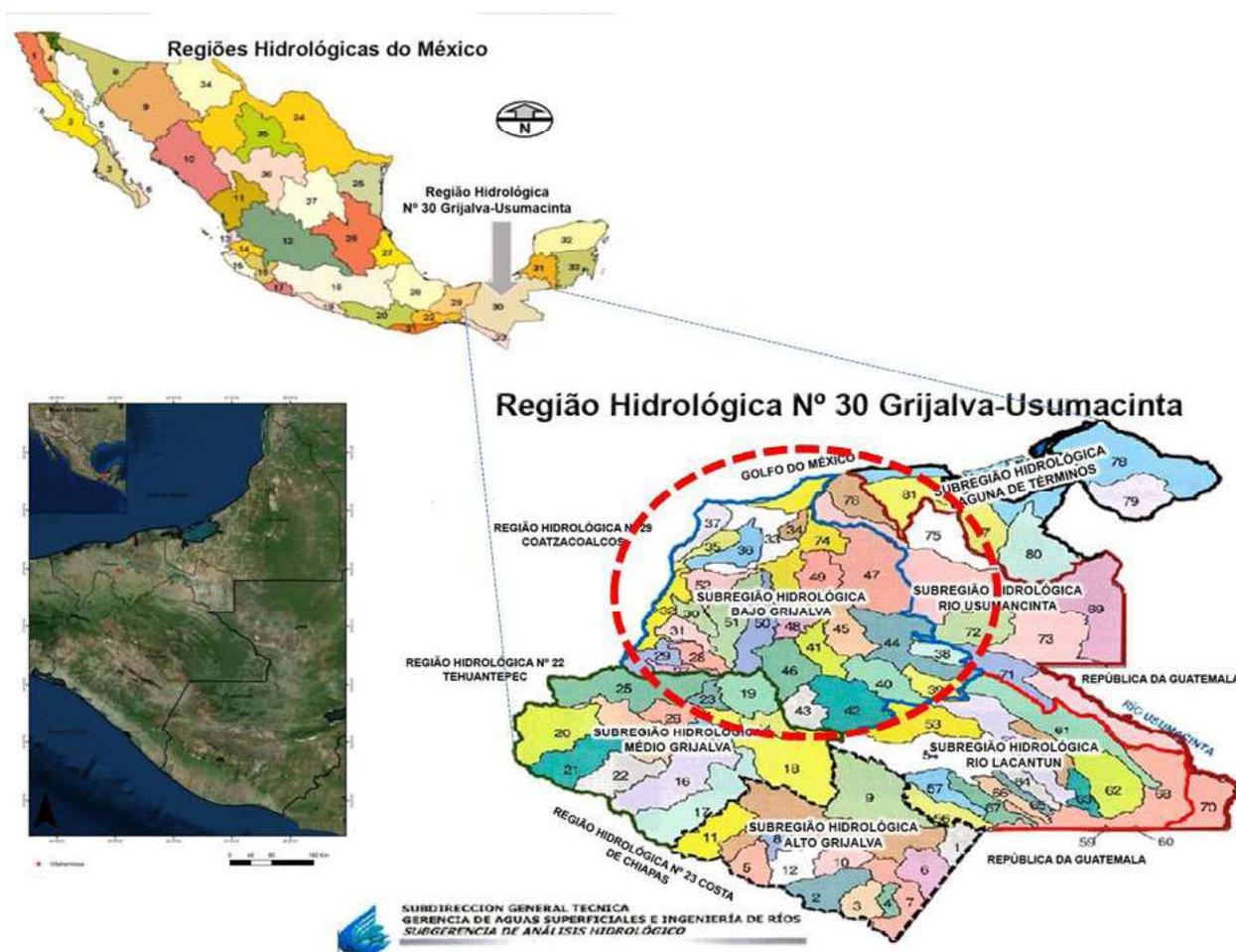


Fig. 1 – Mapa regional de localização da área de estudo.

Fonte da imagem: ESRI, acesso em abril de 2015. Localização no território mexicano da região Hidrológica nº 30 e identificação de suas sub-bacias, em destaque a sub-região hidrográfica Bajo Grijalva. Fonte: DOF (2010).

Até os anos de 1920, a população de Tabasco era predominantemente rural. A partir da década de 1970, as atividades petrolíferas incrementam o crescimento urbano e demográfico da área. Sánchez (2011) cita como efeitos da indústria do petróleo no Estado de Tabasco o crescimento do meio urbano e a migração de trabalhadores, com a consequente diminuição da produção de alimentos. Neste contexto, Villahermosa tornou-se cidade petroleira, concentrando a população de Tabasco. Na década de 1980, o governo do Estado de Tabasco comprou terras e promoveu um projeto habitacional urbano. A cidade de Villahermosa conta hoje com todos os recursos e serviços de uma metrópole moderna.

Todo o processo de desmatamento e crescimento urbano provocou alterações nas condições ambientais, favorecendo a maior vulnerabilidade a fenômenos hidrometeorológicos

extremos. Como exemplo, podem ser mencionadas as inundações que ocorreram em 1980, 1995, 1999, 2007 e 2010.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este item consiste na descrição em detalhe dos materiais utilizados (softwares e dados), como também dos métodos empregados para o desenvolvimento da pesquisa. Assim, ocorre a explanação de todo o processo de tratamento dos dados, desde o pré-processamento até a geração de produtos e sua análise integrada em um ambiente SIG.

3.1 Materiais

Seguem listados abaixo os materiais utilizados no desenvolvimento da pesquisa:

Dezenove imagens SAR do satélite RADARSAT-2;

Curvas de nível (1:25.000) e rede de drenagem (1:250.000) em formato shapefile;

MDT gerado por meio de interpolação de curvas de nível e da rede de drenagem, com resolução espacial de 10 m;

Dados de precipitação adquiridos pela *CONAGUA* (Comisión Nacional del Agua) e fornecidos pela *UNAM* (Universidad Nacional Autónoma de México);

Mapa de uso do solo e vegetação produzido pelo *INEGI* (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) e mapa de localizações urbanas produzido pela *CONAGUA*, ambos abrangendo todo o território mexicano;

Foram utilizados os seguintes programas para o processamento dos dados:

- *ArcGIS* 9.3 e 10.0;
- *PCI Geomática* 10.2;
- *USTC*.

A pesquisa foi desenvolvida empregando a infraestrutura do Laboratório de Sensoriamento Remoto por Radar Aplicado à Indústria do Petróleo (LabSAR – COPPE/UFRJ), onde se pode contar com os softwares de processamento necessários à abordagem proposta.

3.1.1 Imagens RADARSAT-2

A área investigada encontra-se frequentemente coberta por nuvens, o que justificou o uso das imagens SAR, na banda C, obtidas pelo satélite RADARSAT-2. Além disso, destaca-se o potencial de tal produto para o mapeamento de inundações. O modo de operação empregado foi o *Multi Look Fine 1 N*, com área nominal de 50km x 50km, resolução espacial de 6,25m, ângulo de incidência 36,44° e polarização VH para as imagens adquiridas em 18/10/2011; 11/11/2011; 05/12/2011; 29/12/2011; 22/01/2012; 15/02/2012; 10/03/2012; 03/04/2012 e 27/04/2012. A polarização HH corresponde às imagens adquiridas em 21/05/2012; 14/06/2012; 08/07/2012; 01/08/2012; 25/08/2012; 18/09/2012; 12/10/2012; 05/11/2012; 29/11/2012 e 23/12/2012. Todos os dados SAR foram obtidos no horário 12:03 *UTC* (Universal Coordinated Time). A aquisição de dados teve o intuito de registrar todo o ciclo hidrológico local e contribuir para o entendimento da dinâmica climática, o que explica o intervalo temporal de 24 dias entre imagens sucessivas da mesma área (Figura 2).

Frame de Localização das Imagens RADARSAT-2

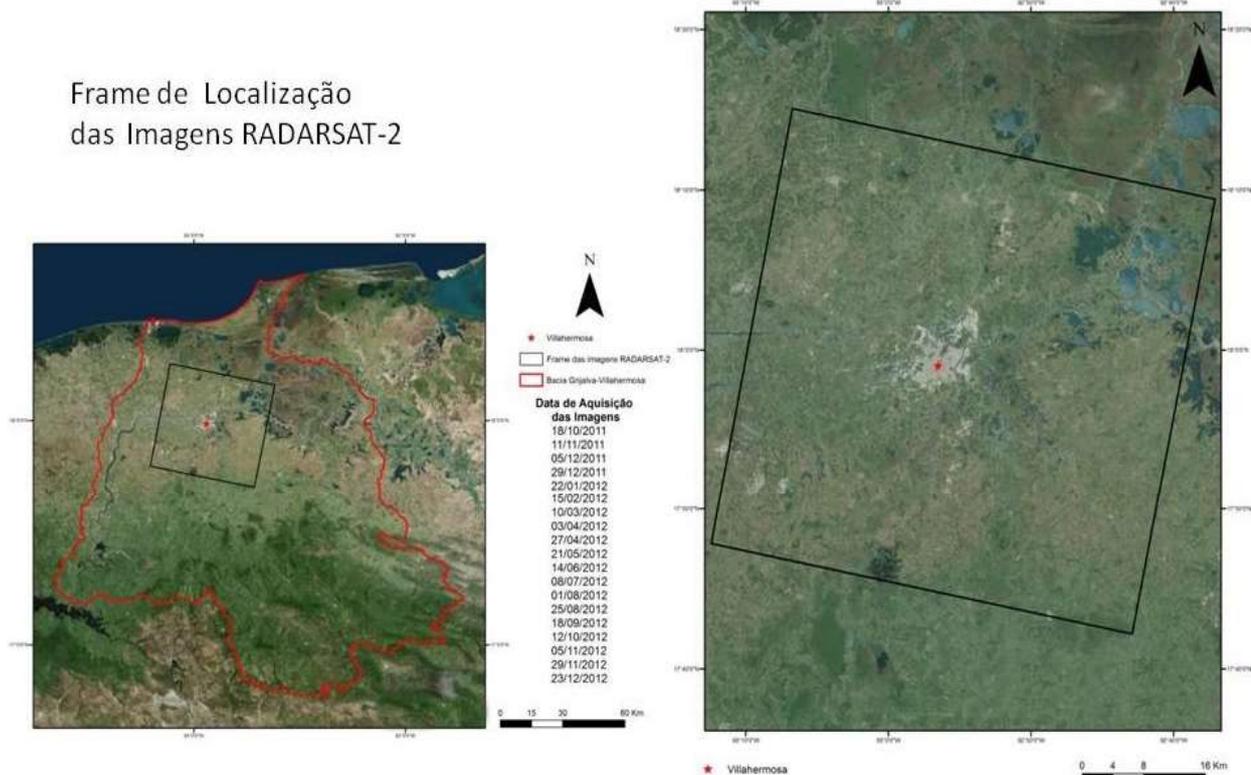


Fig. 2 – Frame de localização das imagens RADARSAT-2. Fonte da imagem: ESRI, acesso em abril de 2015

3.1.2 Corpos D'água e Curvas de Nível

Foram disponibilizadas pela CONAGUA as bases hidrográficas (1:250.000) e de altimetria (1:25.000) do México e da Guatemala. Por se tratarem de dados distintos, eles necessitaram de alguns ajustes topológicos e de referencial para serem unificados. Tais bases serviram como insumos para a construção do MDT elaborado na presente pesquisa.

Optou-se por adotar um MDT próprio pois para análises morfométricas de bacias hidrográficas, este tipo de MNT é mais adequado uma vez que representa a superfície real do terreno, sendo melhor que MDEs como SRTM que representam a superfície do terreno e também os objetos sobre a mesma.

3.1.3 Modelo Digital de Terreno (MDT)

Tendo os rios e as curvas de nível como insumos, foi então executado no presente trabalho o processo de interpolação no software PCI Geomatics. Assim, foi elaborado o MDT para a área da Bacia Grijalva-Usumacinta, muito útil na geração de outros produtos geomorfológicos. Para a análise do relevo, foi adotado o próprio MDT, com 10 metros de resolução espacial. Na

Figura 3A, é exibida uma visão geral da região da Bacia Grijalva-Usumacinta, com a delimitação em vermelho da bacia Grijalva-Villahermosa.

O MDT foi processado de modo que seus produtos derivados fossem usados para uma delineação da bacia hidrográfica e das correspondentes sub-bacias, como também para a obtenção da compartimentação geomorfológica e dos atributos morfométricos.

3.1.4 Dados Pluviométricos

Para as análises da presente pesquisa, a UNAM disponibilizou séries históricas mensais, no período de 1948 a 2008, obtidas por 17 estações climatológicas no Estado de Tabasco, sendo 12 localizadas na Bacia Hidrográfica de Grijalva-Villahermosa. Para os anos de 2007 a 2012, foram disponibilizados dados diários de 62 estações, sendo 29 localizadas em Tabasco e 33 em Chiapas, estando 25 inseridas na Bacia Hidrográfica de Grijalva-Villahermosa (Figura 3B).

A frequência de dados diários de precipitação também justifica o mínimo intervalo possível na aquisição de dados SAR, pois permite uma melhor relação entre os dados.

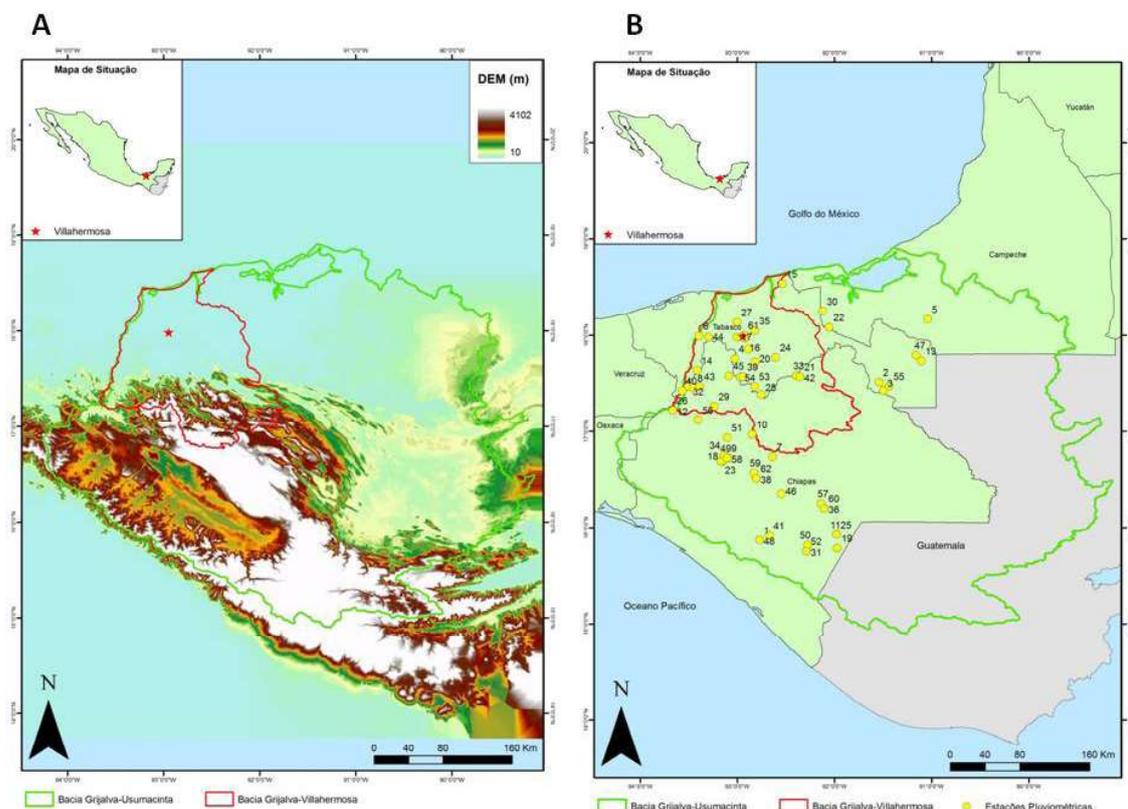


Fig 3 – A) Modelo Digital de Terreno (MDT) em metros, obtido a partir de hidrografia e das curvas de nível, elaborado no presente trabalho. B) Estações climatológicas referentes aos dados diários de precipitação disponibilizados pela UNAM (2007-2012). Fonte: CONAGUA.

3.1.5 Mapa de Uso do Solo, Vegetação e Localidades Urbanas

O mapa de uso solo e vegetação foi adquirido através do website do *INEGI* (<http://www.inegi.org.mx>). A cartografia temática, em escala 1:1.000.000, está disponível

para todo o México. Já a distribuição das localidades urbanas foi disponibilizada pela *CONAGUA*. Na Figura 4, é apresentado um recorte para a Bacia Grijalva-Villahermosa e, em seguida, para o entorno da cidade de Villahermosa.

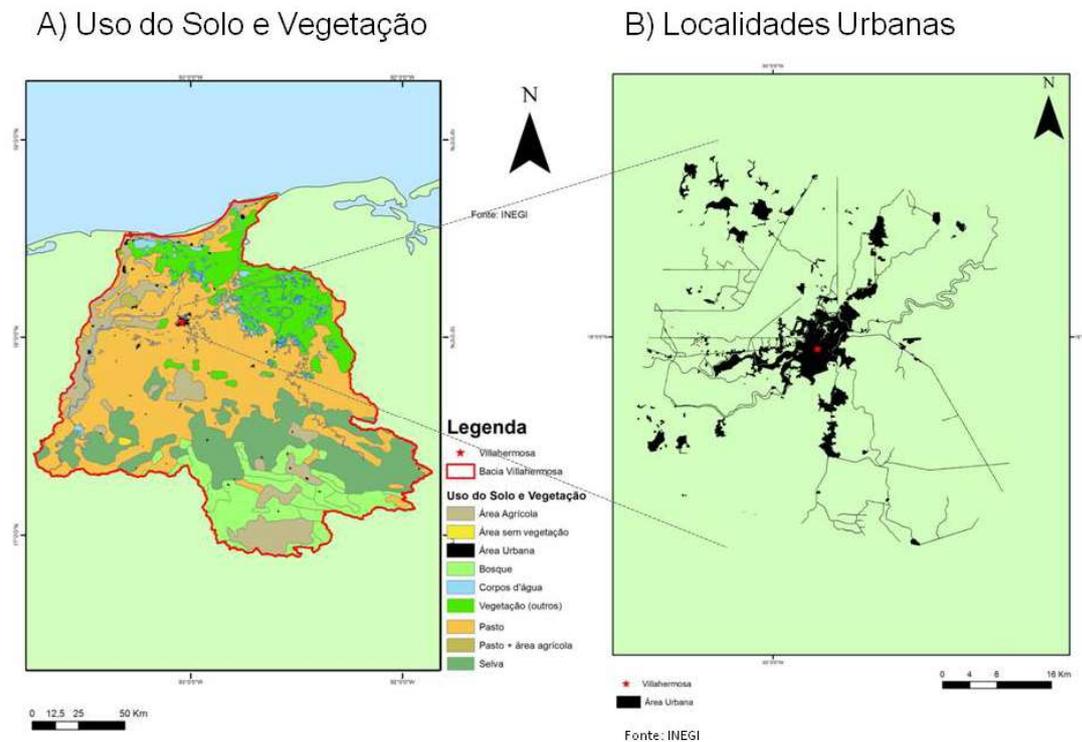


Fig. 4 – Uso do solo e vegetação (A) e localidades urbanas (B) na Bacia Grijalva-Villahermosa. Fonte: *INEGI*.

3.2 Métodos de Processamento

Para alcançar os objetivos propostos neste estudo, serão descritos a seguir os métodos empregados, tais como:

- Processamento digital das imagens SAR;
- Análise geomorfológica e do meio físico da bacia hidrográfica;
- Análise dos dados de precipitação;
- Avaliação da suscetibilidade da Bacia Grijalva Villahermosa ao desenvolvimento de inundações.

A metodologia proposta para o desenvolvimento da pesquisa baseia-se na utilização de imagens SAR, dados de precipitação e produtos derivados do MDT. As imagens SAR foram processadas e classificadas utilizando o algoritmo USTC com a finalidade de se mapear as áreas de vegetação inundada e totalmente cobertas por água. Os dados de precipitação foram trabalhados de duas formas: as séries históricas para contextualizar o problema e os dados

diários, em paralelo com as imagens SAR, para caracterizar o fenômeno de inundação na cidade de Villahermosa, em continuação ao estudo feito por Silva (2010).

O estabelecimento da relação da precipitação com a área coberta por água, assim como as referências históricas, possibilitaram escalonar tais dados para que, junto com a informação do meio físico, fosse construída a matriz de risco fisiográfico. Esta matriz foi a base para a elaboração do índice de risco fisiográfico ao desenvolvimento de inundações. Em seguida, foram elaborados os possíveis cenários para análise em conjunto com os polígonos de área urbana. Assim, foi possível identificar as áreas mais críticas, onde recomenda-se o imageamento por dados SAR para o monitoramento do fenômeno. A metodologia proposta está expressa no fluxograma da Figura 5. Cada uma de suas etapas será detalhada a seguir.

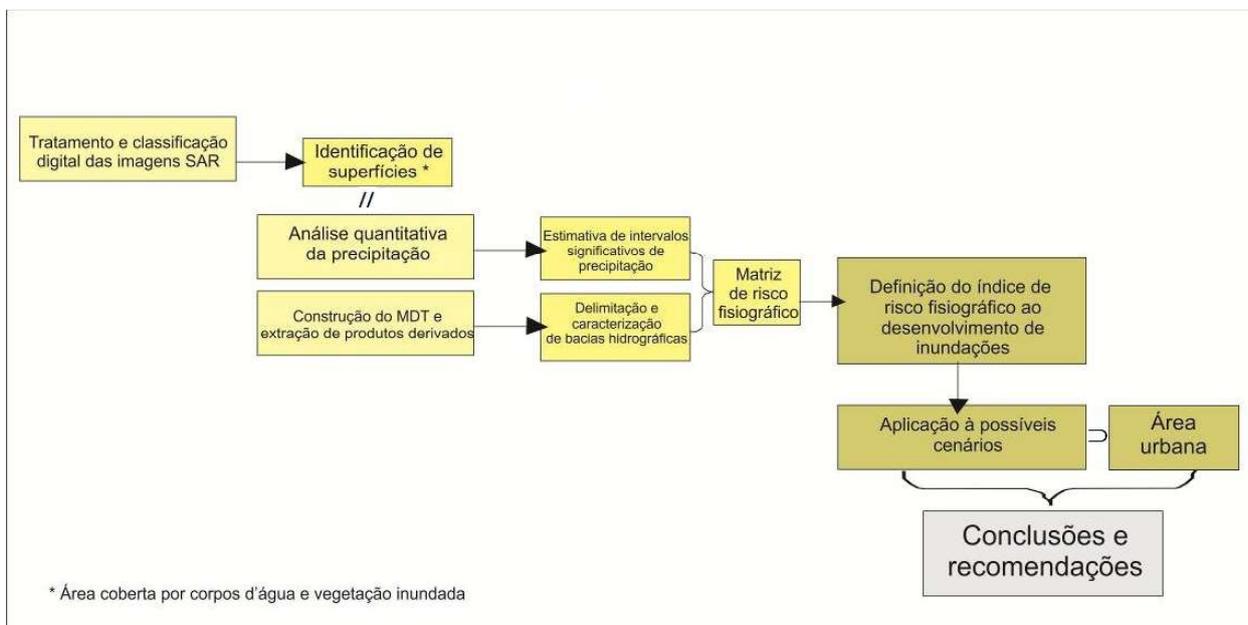


Fig. 5 – Fluxograma de atividades referente ao desenvolvimento da metodologia.

3.2.1 Processamento Digital de imagens

O pré-processamento iniciou-se com a leitura dos dados RADARSAT-2 e sua transcrição em imagem. Logo depois, tratou-se da correção geométrica. Para realizar o georreferenciamento, foi utilizado o sistema geodésico de referência WGS (World Geodetic System) 1984, para o fuso 15 N; o sistema de projeção empregado foi o UTM (Universal Transverse Mercator).

Como a visualização dos elementos texturais é fundamental para o mapeamento temático aqui pretendido, foi usado em seguida um filtro para a redução do ruído speckle, cuja escolha deve levar em consideração a preservação da textura e a menor perda de informação possível na imagem. Neste trabalho, a escolha recaiu sobre o filtro FFROST (3x3). De acordo com o relato de Gonçalves e Souza Filho (2005), o filtro Frost é o que apresenta melhores resultados com dados RADARSAT- 1, uma vez que preserva as características texturais e as feições de borda presentes na imagem original.

Finalmente, os dados foram escalonados de 16 para 8 bits e salvos em formato .raw, que é o utilizado na entrada do software USTC, onde tem início a etapa de classificação da imagem.

Optou-se pelo classificador STC com base na experiência de Miranda e Fonseca (1998), em que a classificação textural por semivariogramas mostrou-se mais eficiente que o método supervisionado por pixel de máxima

verossimilhança para a classificação de áreas de vegetação inundada em imagens SAR,.

As imagens RADARSAT-2 foram submetidas à classificação textural por semivariogramas (USTC – Unsupervised Semivariogram Textural Classifier), que considera informações texturais e radiométricas. O algoritmo emprega a função semivariograma como um descritor de textura, considerando o valor do pixel no contexto de seus vizinhos. Trata-se de um método automático de classificação textural não-supervisionada de imagens de radar que foi inicialmente desenvolvido para a detecção de áreas inundadas na região amazônica (INPE e CENPES, 1999).

A informação textural é descrita pela forma e pelo valor da função semivariograma circular, como também pelo valor dos DN's (digital numbers) em uma vizinhança circular. Já a informação radiométrica é representada pelos DN's das imagens após a eliminação do ruído speckle. O pacote é eficiente no tratamento digital de imagens de radar, visando discriminar áreas com rugosidades distintas. Este classificador é determinístico e manipula informações tanto texturais como radiométricas (MIRANDA *et al.*, 1997).

O primeiro algoritmo de classificação automática baseado na assinatura variográfica de imagens de sensoriamento remoto foi proposto por MacDonald (1991). Há outros exemplos na literatura da utilização de semivariogramas

para a classificação de imagens de radar: discriminação de vegetação com dados SIR-B (MIRANDA *et al.* 1992), (MIRANDA & CARR, 1994); mapeamento de vegetação em regiões de floresta tropical úmida com dados SIR-B e JERS-1 SAR (MIRANDA & BEISL, 1999); identificação de padrões de uso do solo em áreas urbanas com dados do SIR-C (CARR & MIRANDA, 1998); detecção de exsudações de óleo utilizando imagens RADARSAT-1 no Golfo do México (MIRANDA *et al.*, 2004); quantificação de superfícies alagadas para o monitoramento do fenômeno de inundação em Villahermosa, México (SILVA, 2011).

Em seguida, foi empregado o algoritmo Isodata Clustering (TOU & GONZÁLES, 1974), que identifica padrões quantitativos na imagem e os classifica. Estes padrões são identificados como clusters (agrupamentos) e as classes são determinadas pela análise de agrupamentos (cluster analysis).

A partir deste procedimento, ocorreu uma etapa de agregação interativa das imagens classificadas, com o objetivo de individualizar três classes, considerando o tipo de espalhamento (scattering) predominante na interação alvo-pulso do radar: 1. Reflexão especular, 2. Espalhamento difuso e 3. Reflexão de canto. Neste estudo, as classes foram individualizadas da seguinte forma: 1. Corpos d' água (reflexão especular), 2. Floresta seca (espalhamento difuso) e 3. Regiões de vegetação inundada (reflexão de canto). Normalmente, quando ocorre a reflexão de canto, pode-se representar as áreas de edificações ou de vegetação inundada. Na presente pesquisa, adotou-se uma máscara com os polígonos de área urbana para que tais locais não fossem considerados durante o processo de classificação. Com isso, garantiu-se que as áreas de reflexão de canto correspondem apenas à classe vegetação inundada.

Para Foody (2002), no mapeamento temático dos dados de sensoriamento remoto, o termo acurácia é usado para expressar o grau de precisão da classificação. Assim, a mesma é considerada precisa quando fornece uma representação fidedigna da área de estudo.

Na presente pesquisa, a matriz de confusão foi empregada para avaliar a acurácia obtida pela classificação USTC, através da comparação dos

dados classificados com os dados de referência. Conjuntos de amostras relativas a cada classe de interesse foram adquiridos não-tendenciosamente nas imagens SAR.

Este processo foi realizado para cada uma das dezenove imagens. A unidade de amostragem considerada foi o pixel. Como a pesquisa envolve apenas 3 classes (água, floresta seca e vegetação inundada), o número total de amostras foi 500. Elas foram obtidas por amostragem aleatória estratificada uniforme, ou seja, foi sorteado igual número de amostras para cada classe. Segundo Congalton e Green (1999), a grande vantagem deste método é garantir que todas as classes, independente de sua proporção espacial, sejam contempladas na amostra.

Após a conclusão do processo de amostragem, foi construída a matriz de erro, a partir da qual foi possível calcular algumas medidas descritivas como a acurácia global, do usuário e do produtor, assim como o índice de concordância Kappa.

A precisão de cada classe reflete as ocorrências corretas para suas alocações, que são obtidas pela matriz de confusão e pelo número de vezes em que as mesmas ocorrem na matriz. Tal relação revela-se através da acurácia do usuário e da acurácia do produtor. O índice Kappa é uma técnica utilizada para avaliar a acurácia de uma classificação temática de imagens em sensoriamento remoto, de acordo com Congalton e Green (1999).

Uma das vantagens para o uso do Kappa é que ele também incorpora a informação dos pixels mal classificados, não considerando aqueles bem classificados como exatidão global. Em síntese pode-se dizer que a exatidão global é um índice que superestima a confiabilidade da classificação, sendo o Kappa uma avaliação mais adequada (ROVEDDER, 2007).

Em alguns estudos como Beisl (2009), Fuchshuber (2011) e Silva (2015) a matriz de confusão vem sendo empregada para avaliar a acurácia obtida pela classificação USTC.

A última etapa do processamento das imagens consistiu na quantificação da extensão das classes temáticas. Na presente pesquisa, as áreas de vegetação inundada e corpos d' água são as mais relevantes.

3.2.2 Metodologia para a Avaliação da Suscetibilidade de Bacias Hidrográficas ao Desenvolvimento de Inundações

A Matriz de Risco (MR) consiste em uma ferramenta que permite avaliar a associação das possíveis consequências de um evento com a frequência com que este evento ocorra (MARKOWSKI & MANNAN, 2008).

Nos últimos anos, muitos autores vem utilizando a matriz de risco para avaliar diversos tipos de atividades ou fenômenos que apresentam perigo. Posthumus *et al.* (2008) desenvolveram uma Matriz de risco para avaliar o risco de inundação em regiões de plantio, enquanto Markowski e Mannan (2008) desenvolveram uma Matriz de Risco utilizando lógica fuzzy para a análise de falhas em motores.

Inspirada na matriz de risco proposta por Markowski e Mannan (2008), como também com o intuito de avaliar a associação das possíveis precipitações acumuladas com as condições do meio físico da bacia hidrográfica, foi concebida a

Matriz de Risco Fisiográfico ao desenvolvimento de inundações.

A elaboração da matriz seguiu as seguintes etapas: (a) caracterização, atribuição de valores e escalonamento das condições do meio físico da bacia hidrográfica; (b) caracterização e escalonamento dos dados de precipitação; (c) associação dos insumos de entrada e ranqueamento do risco obtido em graus de susceptibilidade, variando entre muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto (Figura 6).

Assim, foi possível definir o índice de risco que foi aplicado na simulação de possíveis cenários para a bacia hidrográfica. Com as ferramentas de análise espacial do programa ArcGIS, pode-se focalizar a atenção nas áreas urbanas no entorno da cidade de Villahermosa e indicar as regiões de maior demanda de imageamento para monitoramento futuro do fenômeno de inundações.

A Figura 7, em continuidade a Figura 6, mostra um fluxograma do desenvolvimento das atividades descritas acima.

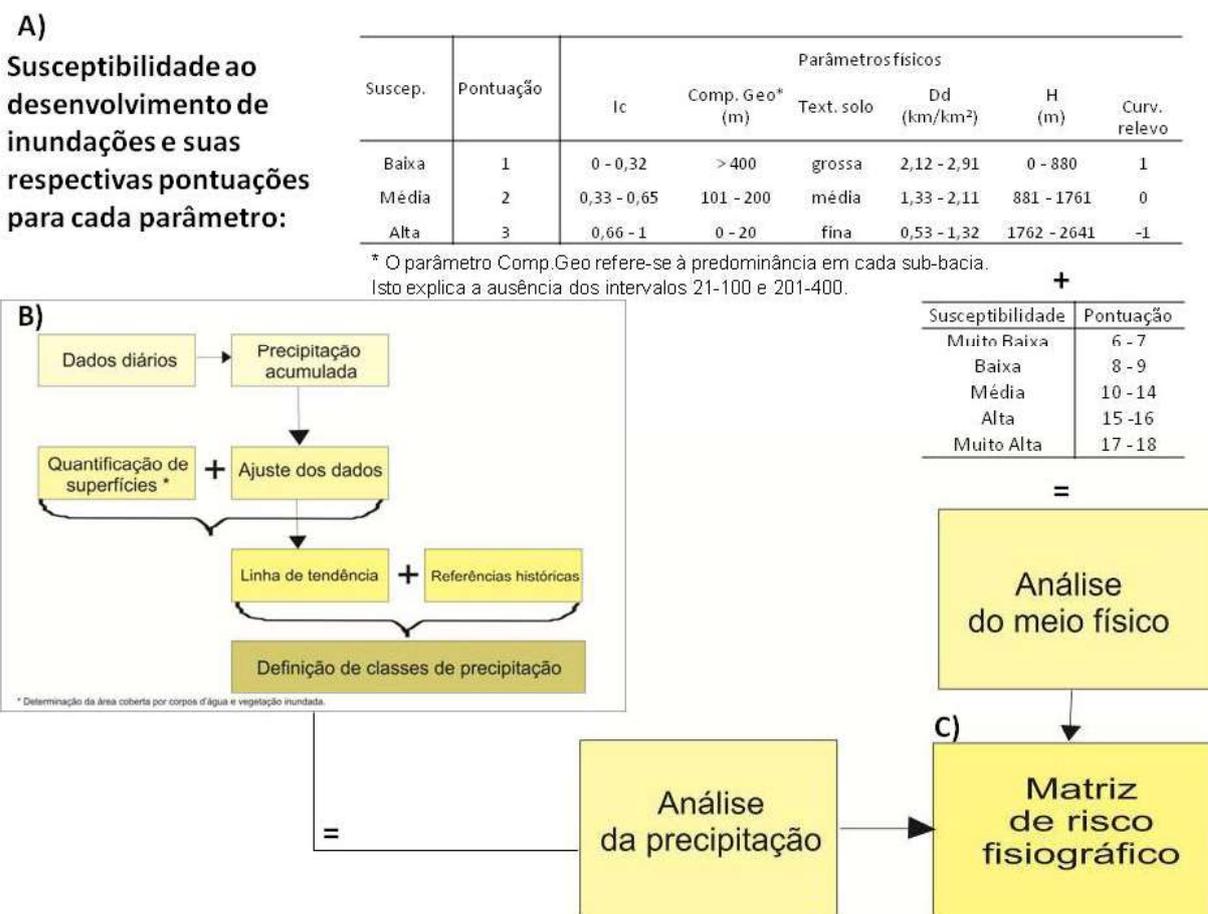


Fig. 6 – Fluxograma de atividades referente à concepção da matriz de risco.

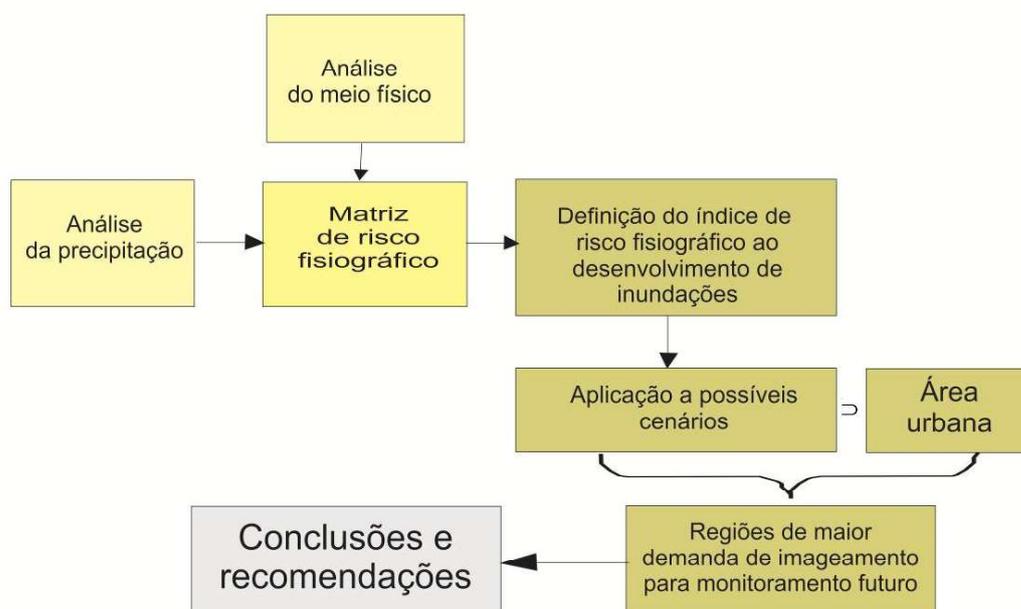


Fig. 7 – Fluxograma de atividades referente à metodologia empregando a matriz de risco para a avaliação da suscetibilidade de bacias hidrográficas ao desenvolvimento de inundações.

A caracterização do meio físico da Bacia Hidrográfica Grijalva-Villahermosa se deu de maneira semi-qualitativa pela integração de seis parâmetros físicos: índice de circularidade (Ic), compartimentação geomorfológica, textura do solo, densidade de drenagem (Dd), amplitude topográfica (H) e curvatura do relevo. A unidade em superfície adotada foi a divisão de sub-bacias da Bacia Hidrográfica Grijalva-Villahermosa que pode ser observada na figura 1.

Para cada sub-bacia, foram calculados os

valores de cada parâmetro listado acima. Como cada um deles apresenta uma série de valores distintos, foi necessário dividir as séries em intervalos homogêneos.

O passo seguinte constou da classificação de cada série de valores em função do seu grau relativo de suscetibilidade. Para facilitar a classificação final de cada sub-bacia, utilizou-se um artifício matemático, tal que, para cada classe de suscetibilidade, foi atribuído um número de pontos (Tabela 1).

Tabela 1: Susceptibilidade ao desenvolvimento de inundações e suas respectivas pontuações para cada parâmetro

Suscep.	Pontuação	Parâmetros físicos					
		Índice Circularid.	Comp. Geo (m)	Text. solo	Densidade drenagem (km/km ²)	Amplitude Top. (m)	Curv. relevo
Baixa	1	0 - 0,32	> 400	grossa	2,12 - 2,91	0 - 880	1
Média	2	0,33 - 0,65	101 - 200	média	1,33 - 2,11	881 - 1761	0
Alta	3	0,66 - 1	0 - 20	fina	0,53 - 1,32	1762 - 2641	-1

* O parâmetro Comp.Geo refere-se à predominância em cada sub-bacia. Isto explica a ausência dos intervalos 21-100 e 201-400.

Obtidas todas as pontuações individuais de cada parâmetro para cada sub-bacia, procedeu-se a somatória do número total de pontos para cada uma. Assim, o número mínimo de pontos

obtidos seria 6 e o máximo 18. Tal pontuação final também foi classificada (Tabela 2).

Este método de obtenção de susceptibilidade baseou-se no trabalho de Souza (2005).

Tabela 2: Suscetibilidade ao desenvolvimento de inundações e suas respectivas pontuações para o escalonamento dos fatores físicos

Suscetibilidade	Pontuação
Muito Baixa	6 - 7
Baixa	8 - 9
Média	10 - 14
Alta	15 - 16
Muito Alta	17 - 18

Para a caracterização e escalonamento dos dados de precipitação, foram consideradas as séries históricas de máximos acumulados e a referência de Sánchez (2011), que destaca os fenômenos hidrometeorológicos extremos ocorridos nos anos de 1980, 1995, 1999, 2007 e 2010. Em 1980 o máximo valor registrado foi 943mm em outubro na estação Villahermosa; em 1995, 735mm em setembro na estação Nacajuca; em 1999, 971mm em outubro na estação Jalapa; em 2007, 1020mm também em outubro na estação San Joaquim e o máximo dos valores em agosto de 2010, 1193 mm na estação Teapa.

Tais valores de precipitação acumulada serviram como referência para definir as classes “Alto” e “Muito Alto”. Os demais valores, correspondentes às classes “Moderado”, “Baixo” e “Muito Baixo”, basearam-se nas observações não só das séries históricas, mas também dos dados diários e da superfície coberta por água entre o período de outubro de 2011 a dezembro de 2012. Com efeito, neste período são observados os níveis muito baixo, baixo e moderado de superfície coberta por água. Todos os intervalos de classes e seus respectivos níveis de suscetibilidade podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3: Suscetibilidade ao desenvolvimento de inundações e suas respectivas classes de precipitação acumulada

Suscetibilidade	Precipitação (mm)
Muito Baixa	< 400
Baixa	400 - 599
Média	600 - 699
Alta	700 - 1000
Muito Alta	> 1000

A etapa final da metodologia consistiu em associar os insumos de entrada (meio físico e

precipitação), o que configurou a edição gráfica da matriz, como também em ranquear os níveis de risco obtidos configurando um índice.

O índice de risco obtido foi usado em ambiente SIG para simular possíveis cenários. Considerando-se as condições do meio físico para cada classe de precipitação acumulada, foi criado um possível cenário de resposta. Integrando-se os polígonos de área urbana a estes cenários, pode-se identificar os locais de perigo para a população, que são insumos importantes para ações de planejamento futuro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são apresentados e discutidos neste item que aborda a classificação das imagens SAR e sua avaliação quanto à acurácia, a análise das bacias hidrográficas e a matriz construída a partir da integração dos dados e o índice de risco fisiográfico ao desenvolvimento de inundações.

4.1 Classificação Temática das Imagens SAR

A interpretação das imagens SAR classificadas pelo USTC permitiu agregar os clusters que foram obtidos pelo algoritmo Isodata em três classes (floresta seca, corpos d’água e vegetação inundada).

De acordo com as características climáticas predominantes na área de estudo, os meses de junho a janeiro são marcados pela temporada de chuva, com maior intensidade a partir do mês de setembro devido à temporada de ciclones. Os meses de fevereiro a maio são marcados pela temporada de seca.

O período de imageamento da região investigada se deu entre outubro de 2011 e dezembro de 2012, com o intuito de registrar todos os efeitos da variação climática. As classes temáticas extraídas da classificação das imagens RADARSAT-2 mostram o nível máximo de corpos d’água e de vegetação inundada em outubro de 2011. Ademais, percebe-se o decréscimo em superfície dos corpos d’água até dezembro de 2011 e o mínimo registrado em maio de 2012.

Os gráficos apresentados na figura 8 mostram a variação em superfície das classes temáticas ao longo do período de imageamento. A classe em azul corresponde aos corpos d’água e superfícies totalmente cobertas por água; em amarelo, às áreas de vegetação inundada; em verde, às florestas secas.

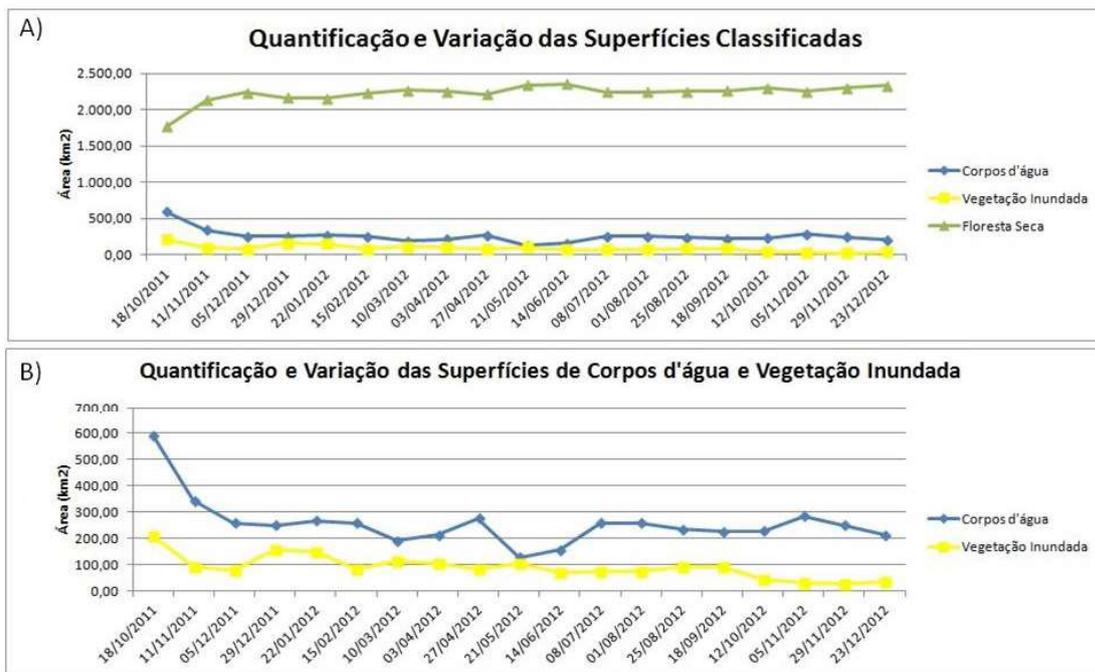


Fig. 8 – Variação no tempo da extensão em superfície das classes temáticas (A) e Variação no tempo da extensão em superfície apenas de corpos d'água e vegetação inundada (B).

O primeiro gráfico (A) mostra a variação em superfície das três classes temáticas ao longo do período de imageamento. Percebe-se que, quando acontece o aumento em área de floresta seca, ocorre paralelamente o decréscimo das superfícies de corpos d'água e vegetação inundada.

Como, na presente pesquisa, as áreas de vegetação inundada e corpos d'água são mais relevantes, foi elaborado o segundo gráfico (B), para que suas variações pudessem ser observadas com maior detalhamento.

Nota-se que o início do imageamento, outubro de 2011, marca o período dos níveis mais elevados das superfícies corpos d'água e vegetação inundada. Em seguida, ocorre o decréscimo das mesmas até 05/12/2011.

No estudo apresentado por Silva (2010), a validação da classificação textural USTC se deu pela comparação entre os corpos d'água obtidos por este procedimento no mês de referência para estação seca (Abril/2000) e aqueles disponibilizados pelo SWBD (SRTM Water Body Data), produto da missão espacial SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).

A distribuição dos corpos d'água em superfície é muito similar. Todavia, verificou-se que, comparativamente, o SWBD não representa

de modo adequado os rios de grande influência para a zona metropolitana de Villahermosa; já a classificação USTC permite a visualização de todos os corpos d'água com clareza. Assim, percebeu-se a qualidade do produto gerado com o uso do USTC e optou-se por não se empregar o SWBD na pesquisa em epígrafe.

A avaliação da classificação USTC foi realizada por meio da matriz de confusão e do coeficiente Kappa.

Para avaliar o desempenho de uma classificação, os autores Landis e Koch (1977) *apud* Congalton e Green (1999) caracterizaram seis níveis de qualidade, de acordo com o valor do índice Kappa.

A Tabela 4 mostra os valores de Acurácia Total e Coeficiente Kappa para cada imagem aqui processada. Observam-se valores altos em ambos os parâmetros. Assim, das 19 imagens, 10 apresentam o Kappa superior a 0,80 e nove superior a 7,0 o que indica concordância muito forte e substancial, respectivamente.

Segundo Congalton e Green (1999) e Foody (2002), quando os objetos em estudo estão representados por um reduzido número de classes, ocorrem normalmente valores de acurácia total e Kappa altos, tais como os obtidos na presente pesquisa.

Tabela 4: Valores de Acurácia Total e Índice Kappa Obtidos para a Classificação das Imagens Radarsat-2

Img	Acurácia Total	Coefficiente Kappa	Concordância (LANDIS & KOCH 1977)
1	85	0,73	Substancial
2	90,6	0,82	Muito forte
3	92,2	0,85	Muito forte
4	88	0,78	Substancial
5	91	0,82	Muito forte
6	91	0,82	Muito forte
7	87,4	0,75	Substancial
8	87,4	0,73	Substancial
9	90	0,78	Substancial
10	92,2	0,83	Muito forte
11	93,8	0,86	Muito forte
12	87,8	0,73	Substancial
13	87,6	0,71	Substancial
14	92,4	0,84	Muito forte
15	88,6	0,72	Substancial
16	92,8	0,82	Muito forte
17	89	0,77	Substancial
18	92,2	0,81	Muito forte
19	93,6	0,86	Muito forte

4.2 Avaliação da Suscetibilidade de Bacias Hidrográficas ao Desenvolvimento de Inundações

Para avaliar a suscetibilidade da Bacia Grijalva-Villahermosa ao desenvolvimento de inundações, foi realizada a integração dos parâmetros físicos, levando-se em consideração a divisão de suas sub-bacias. A Tabela 5 apresenta os valores obtidos para cada parâmetro por sub-bacia. Em seguida, foi necessário homogeneizar tais valores e classificar sua série em função de seu grau relativo de suscetibilidade (Tabela 6).

A análise da Tabela 6 permite notar que, das 26 sub-bacias, 1 apresenta suscetibilidade muito baixa, 5 baixa, 13 média, 5 alta e 2 muito alta. Tal resultado foi espacializado no mapa da Figura 9.

A suscetibilidade muito baixa ocorre apenas na sub-bacia Tzimzac, enquanto que a muito alta nas sub-bacias Grijalva e Tabasqui. A cidade de Villahermosa encontra-se no limite entre suscetibilidade média e alta (Figura 9). A zona de transição entre os distintos comportamentos geomorfológicos da bacia é caracterizada por suscetibilidade média. Cabe mencionar que os parâmetros físicos em análise estão sendo considerados de forma estática, ao contrário das variações de precipitação acumulada.

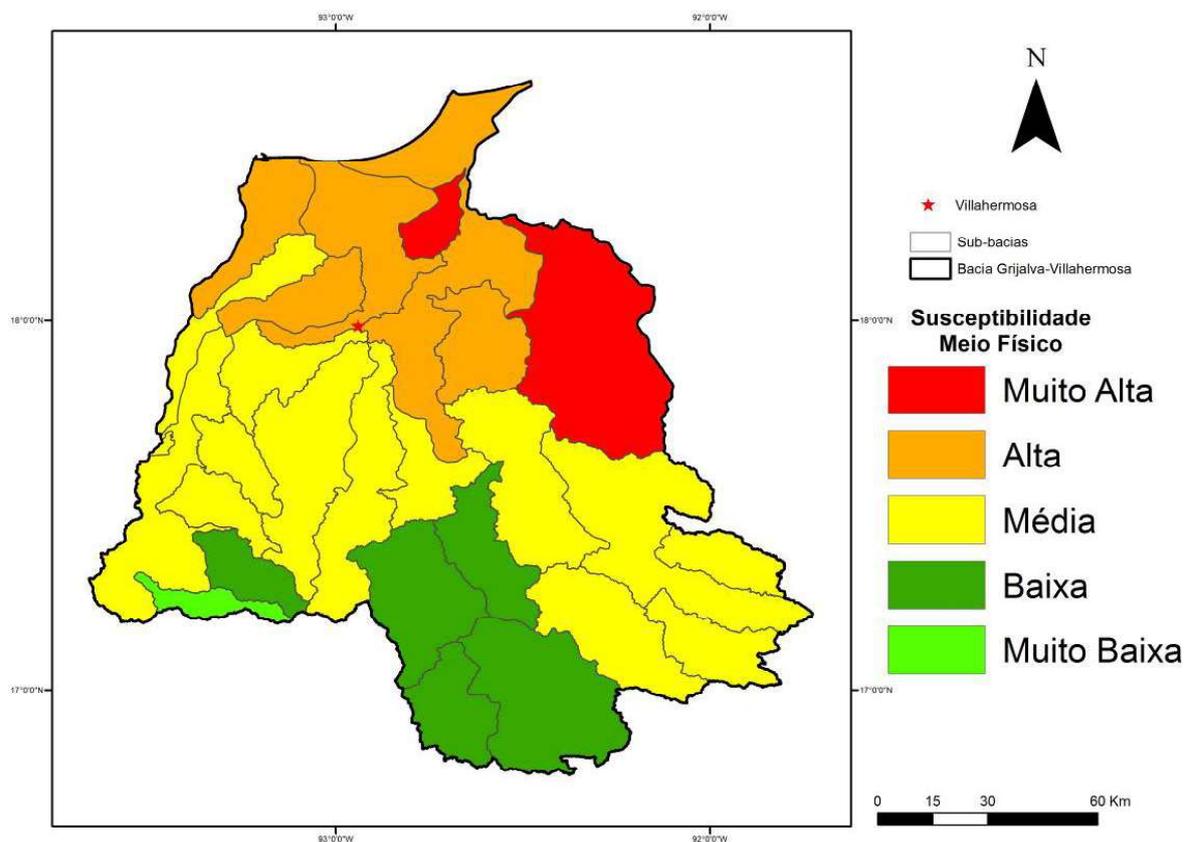


Fig. 9 - Mapa de suscetibilidade do meio físico ao desenvolvimento de inundações.

Tabela 5: Parâmetros físicos obtidos para cada sub-bacia da Bacia Grijalva-Villahermosa. Ver localização na Figura 1

Código	Sub-bacia	Ic	Comp. Geo *	Text. Solo	Dd (km/km ²)	H	Curv. Relevo
27	Tzimbac	0,19	> 400	Grossa	2,16	2241	-1
28	Zayula	0,37	> 400	Grossa	2,45	2360	-1
29 e 32	Presas Penitas e Mezcalapa	0,13	0 - 20	Média	2,11	1022	0
30	Paredón	0,34	0 - 20	Média	2,45	641	0
31	Platanar	0,3	101 - 200	Média	2,92	1104	0
33	Carrizal	0,21	0 - 20	Fina	0,67	20	0
34	Tabasquillo	0,47	0 - 20	Fina	0,53	0	0
35	Cunduacán	0,17	0 - 20	Grossa	0,71	30	0
36	Samaria	0,42	0 - 20	Média	1,16	10	0
37	Cuxcuchapa	0,32	0 - 20	Média	0,54	20	0
38	Basca	0,35	> 400	Média	1,33	860	0
39	Yashijá	0,29	> 400	Média	1,46	1750	-1
40	Shumulá	0,34	> 400	Grossa	1,32	2160	-1
41	Puxcatán	0,25	> 400	Grossa	1,32	2140	-1
42	Chacté	0,39	> 400	Grossa	1,43	2640	-1
43	Los Plátanos	0,4	> 400	Grossa	1,37	2600	-1
44	Tulijá	0,19	> 400	Grossa	1,38	1490	-1
45	Macuspana	0,28	0 - 20	Média	1,3	2090	0
46	Almendro	0,43	> 400	Grossa	1,54	2441	-1
47	Chilapa	0,42	0 - 20	Fina	0,92	270	0
48	Tacotalpa	0,22	0 - 20	Média	1,26	1010	0
49	Chilapilla	0,37	0 - 20	Fina	1,69	60	0
50	La Sierra	0,19	> 400	Média	1,61	2450	0
51	Pichucalco	0,24	0 - 20	Média	1,95	2130	0
52	Viejo Mezcalapa	0,26	0 - 20	Média	2	70	0
74	Grijalva	0,11	0 - 20	Fina	0,77	80	0

* O parâmetro Comp.Geo refere-se à predominância em cada sub-bacia. Isto explica a ausência dos intervalos 21-100 e 201-400.

Adaptado de Souza (2005).

Tabela 6: Valores dos parâmetros e susceptibilidade das sub-bacias da Bacia Grijalva-Villahermosa. Os critérios para o escalonamento da susceptibilidade encontram-se na Tabela 2

Código	Sub-bacia	Ic	Comp. Geo	Text. Solo	Dd	H	Curv. Relevo	Σ	Susceptibilidade
27	Tzimbac	1	1	1	1	1	2	7	Muito Baixa
28	Zayula	2	1	1	1	1	2	8	Baixa
29 e 32	Presa Penitas e Mezcalapa	1	3	2	2	2	3	13	Média
30	Paredón	2	3	2	1	3	3	14	Média
31	Platanar	1	2	2	1	2	3	11	Média
33	Carrizal	1	3	3	3	3	3	16	Alta
34	Tabasquillo	2	3	3	3	3	3	17	Muito Alta
35	Cunduacán	1	3	1	3	3	3	14	Média
36	Samaria	2	3	2	3	3	3	16	Alta
37	Cuxcuchapa	1	3	2	3	3	3	15	Alta
38	Basca	2	1	2	2	3	3	13	Média
39	Yashijá	1	1	2	2	2	2	10	Média
40	Shumulá	2	1	1	3	1	2	10	Média
41	Puxcatán	1	1	1	3	1	2	9	Baixa
42	Chacté	2	1	1	2	1	2	9	Baixa
43	Los Plátanos	2	1	1	2	1	2	9	Baixa
44	Tulijá	1	1	1	2	2	3	10	Média
45	Macuxpana	1	3	2	3	1	3	13	Média
46	Almendro	2	1	1	2	1	2	9	Baixa
47	Chilapa	2	3	3	3	3	3	17	Muito Alta
48	Tacotalpa	1	3	2	3	2	3	14	Média
49	Chilapilla	2	3	3	2	3	3	16	Alta
50	La Sierra	1	1	2	2	1	3	10	Média
51	Pichucalco	1	3	2	2	1	3	12	Média
52	Viejo Mezcalapa	1	3	2	2	3	3	14	Média
74	Grijalva	1	3	3	3	3	3	16	Alta

Adaptado de Souza (2005).

4.3 Matriz e Índice de Risco

Assim, foi possível elaborar a matriz de risco fisiográfico para o conjunto de classes de condições do meio físico e para os níveis

de precipitação acumulada, levando em consideração a suscetibilidade de bacias de drenagem ao desenvolvimento de inundações em zonas costeiras tropicais (Figura 10).

Matriz de risco para inundação na Bacia Grijalva - Villahermosa			Geomorfologia (Σfatores do meio físico)				
			Muito Baixo 6 e 7	Baixo 8 e 9	Médio 10 a 14	Alto 15 e 16	Muito Alto 17 e 18
Precipitação acumulada (mm)	Muito Alto	> 1000	C18	C19	C23	C24	C25
	Alto	700 - 1000	C15	C16	C17	C21	C22
	Medio	600 - 699	C6	C12	C13	14	C20
	Baixo	400 - 599	C4	C5	C9	C10	C11
	Muito baixo	< 400	C1	C2	C3	C7	C8

Fig. 10 - Matriz de risco fisiográfico ao desenvolvimento de inundações na Bacia Grijalva-Villahermosa.

O índice de risco (Tabela 7) a inundações na Bacia Grijalva-Villahermosa foi obtido pela descrição de cada célula da matriz de risco (Figura 10).

Cada nível deve ser interpretado de acordo com o somatório de fatores do meio físico e a ocorrência de precipitação acumulada no período de 30 dias.

Considerou-se na presente pesquisa que a Bacia Grijalva-Villahermosa foi caracterizada de modo estático de acordo com o meio físico. Em seguida, foi realizado o cruzamento de tais características com variações dinâmicas da precipitação. Assim, cada célula da matriz representa uma situação e se encontra agrupada em níveis de risco fisiográfico ao desenvolvimento de inundações.

4.4 Análise Espacial Para Definição de Áreas De Perigo

Considerando o fato de que na natureza ocorrem diversos fenômenos que fazem parte da dinâmica terrestre e são responsáveis pela estruturação da paisagem, e que quando tais fenômenos ocorrem ou se deslocam sobre um sistema social podem causar uma situação potencial de perigo a pessoas e bens, os limites das áreas urbanas contribuíram com a análise para a identificação das áreas de perigo.

Segundo Kelman (2002), o conceito de risco está associado ao perigo e à vulnerabilidade. O perigo se refere à potencialidade do fenômeno natural causar danos à sociedade. A vulnerabilidade, por outro lado, se refere às

características da sociedade em reagir aos danos causados pelo fenômeno.

Tabela 7: Índice de Risco Fisiográfico ao Fenômeno de Inundação

Célula da Matriz	Meio Físico	Precipitação acumulada	Índice de Risco Fisiográfico
C1	6 e 7	< 400	Muito Baixo
C2	8 e 9	< 400	Baixo
C3	10 a 14	< 400	
C4	6 e 7	400 - 599	
C5	8 e 9	400 - 599	
C6	6 e 7	600 - 699	
C7	15 e 16	< 400	Moderado
C8	17 e 18	< 400	
C9	10 a 14	400 - 599	
C10	15 e 16	400 - 599	
C11	17 e 18	400 - 599	
C12	8 e 9	600 - 699	
C13	10 a 14	600 - 699	
C14	15 e 16	600 - 699	
C15	6 e 7	700 - 1000	
C16	8 e 9	700 - 1000	
C17	10 a 14	700 - 1000	
C18	6 e 7	> 1000	
C19	8 e 9	> 1000	
C20	17 e 18	600 - 699	Alto
C21	15 e 16	700 - 1000	
C22	17 e 18	700 - 1000	
C23	10 a 14	> 1000	
C24	15 e 16	> 1000	
C25	17 e 18	> 1000	Muito Alto

Na presente pesquisa, os polígonos de área urbana foram adotados como limites de perigo por ser um local de concentração da sociedade.

O mapa da Figura 11 apresenta as áreas urbanas da Bacia Grijalva-Villahermosa juntamente com a suscetibilidade do meio físico.

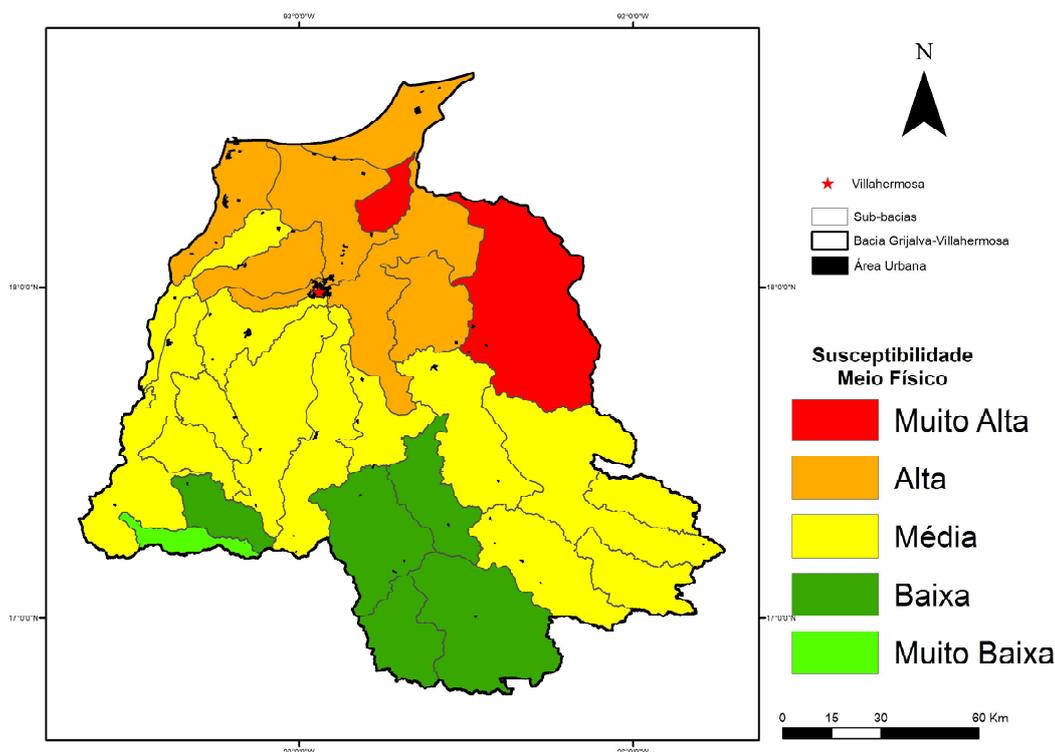


Fig.11 – Suscetibilidade do meio físico e limite de áreas urbanas.

De acordo apenas com a suscetibilidade do meio físico (Figura 8), a cidade de Villahermosa encontra-se entre os limites das classes média e alta. Mas, sabe-se que o fenômeno de inundação que ocorre no entorno da cidade muitas vezes apresenta características desastrosas para a população.

Com a sobreposição mostrada na Figura 11, percebe-se que as áreas mais críticas seriam as sub-bacias Chilapa e Tabasqui, representadas em vermelho. Nelas, os polígonos de área urbana são pequenos, mas não seria recomendada a expansão urbana devido à localização de risco.

Após a análise de tal resultado, foi feita a validação do índice de risco fisiográfico ao desenvolvimento de inundação (Tabela 7') com o resultado de classificação de imagens SAR, objetivando comparar o conceito proposto e a verdade terrestre.

4.5 Verificação do Índice de Risco à Inundações com Imagens RADARSAT-2 e Aplicações

Observando-se a Figura 11, é possível perceber que a área urbana da cidade de Villahermosa encontra-se em uma zona de alta

suscetibilidade do meio físico, o que justificaria seu imageamento sistemático com sensores do tipo SAR para o monitoramento de inundações.

Com o intuito de verificar o índice de risco fisiográfico, a classificação da imagem RADARSAT-2 adquirida em 18/10/2011, que representa o nível máximo de inundação no intervalo de tempo analisado, foi sobreposta ao mapa de suscetibilidade do meio físico (Figura 12).

Com a sobreposição apresentada na Figura 11, nota-se que realmente ocorre inundação na zona de alta suscetibilidade. Para esta imagem, adquirida em 18/10/2011, a precipitação acumulada corresponde a 577,83 mm, o que representa o nível baixo de precipitação.

Tal hipótese está de acordo com a classificação da imagem e com as referências históricas, pois se sabe que a inundação ocorrida no ano de 2011 não representou um fenômeno hidrometeorológico extremo, e sim um evento normal. Todas as outras imagens analisadas na presente pesquisa apresentam níveis de precipitação correspondentes menores que 400 mm.

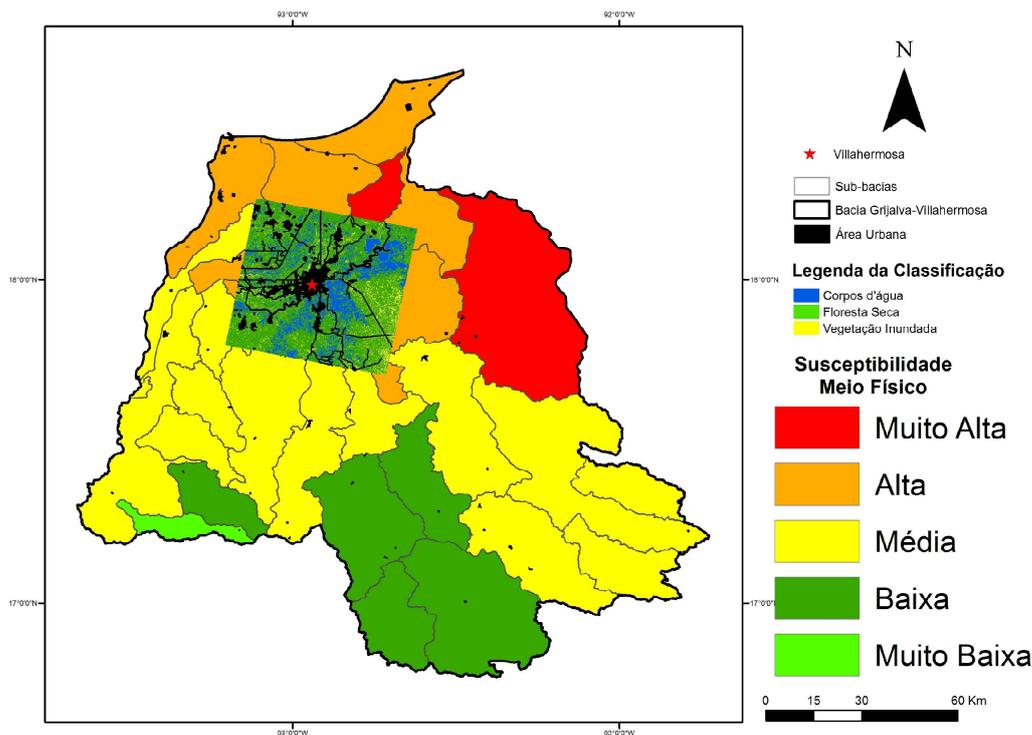


Fig 12 - Sobreposição da classificação da imagem RADARSAT-2 adquirida em 18/10/2011 ao mapa de susceptibilidade do meio físico e limite de áreas urbanas.

Assim, a classificação das imagens SAR também foi usada para validar o índice e verificar se o mesmo pode ser empregado para apontar zonas críticas, onde se justifica o uso desses dados para o monitoramento preventivo do fenômeno.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi apresentada uma abordagem relevante no uso de imagens de sensoriamento remoto na faixa de microondas, visando ao desenvolvimento de uma metodologia de avaliação da susceptibilidade a inundações em zonas costeiras tropicais.

Considerando a região de estudo como um ambiente de alta complexidade climática devido à intensa cobertura de nuvens, a classificação textural das imagens RADARSAT-2 mostrou ser uma eficiente ferramenta para a detecção de mudanças com relação ao nível d'água sobre a superfície.

Infelizmente, para fins científicos, durante o período de aquisição de dados (outubro de 2011 a dezembro de 2012) não ocorreu um fenômeno meteorológico extremo. O nível máximo de superfície coberta por água não foi tão significativo, em comparação com o evento extremo mais recente, que ocorreu no

ano de 2007. Então, para calibrar o método, seria interessante a consulta em acervo junto à MDA, operadora do satélite, visando à possível disponibilização de dados para tal ano.

Sobre a caracterização do meio físico, foram utilizados seis parâmetros: índice de circularidade (Ic), compartimentação geomorfológica, textura do solo, densidade de drenagem (Dd), amplitude topográfica (H) e curvatura do relevo. Entretanto, em uma ampliação do escopo deste trabalho ou em uma aplicação da metodologia em outra área de estudo, é importante integrar o maior número de parâmetros possível ao método de determinação da susceptibilidade do meio físico.

De maneira geral, a análise geomorfológica e de parâmetros do meio físico foi fundamental ao mapeamento da susceptibilidade às inundações. Tal etapa constituiu um diagnóstico das sub-bacias, o que pode trazer diversos benefícios à sociedade por ser um guia para as políticas públicas de prevenção e controle de inundações.

Além de propor uma metodologia para a avaliação da susceptibilidade a inundações em zonas costeiras tropicais, foi possível elaborar o diagnóstico do meio físico da Bacia Grijalva-Villahermosa. A dinâmica de chuvas foi analisada através de séries históricas e dados diários e, com isso, foram definidas classes de significância. A

classificação digital das imagens RADARSAT-2 permitiu a identificação de superfícies no entorno da cidade de Villahermosa. Foi proposto o método de avaliação da suscetibilidade, com diferentes graus de suscetibilidade de bacias de drenagem ao desenvolvimento de inundações. Em seguida, foi gerado o índice de risco ao fenômeno de inundação. Este foi validado com imagens SAR e, ao final da pesquisa, pode-se oferecer a metodologia como subsídio ao planejamento e melhor gerenciamento da Bacia Hidrográfica Grijalva-Villahermosa.

Nota-se a utilidade da metodologia resultante deste trabalho para o gerenciamento da bacia estudada, pois pode contribuir para evitar danos sociais, ambientais e econômicos provocados por desastres naturais decorrentes de inundações.

Recomenda-se a incorporação desta metodologia com a finalidade de monitorar a precipitação e as áreas de perigo. No caso da Bacia Grijalva-Villahermosa, as áreas mais críticas seriam as sub-bacias Chilapa e Tabasqui. Nelas, os polígonos de área urbana são pequenos, mas não seria recomendada a expansão urbana devido à localização de risco. Em tais áreas, assim como no entorno da cidade de Villahermosa, recomenda-se o imageamento com fins de monitoramento e a geração de produtos de altimetria bem apurados, obtidos, por exemplo, a partir de dados LIDAR, para simulação de situações de desastre.

Cabe ressaltar que a metodologia foi proposta para uma área teste, a Bacia Hidrográfica Grijalva-Villahermosa, onde está inserida a cidade de Villahermosa. No entanto, mediante a disponibilidade de dados, a mesma abordagem pode ser aplicada em outras áreas costeiras tropicais. Na ausência de dados de precipitação adquiridos por estações pode-se usar dados estimados por satélites. Para cada bacia, pode-se elaborar sua própria matriz com valores específicos para cada situação, uma vez que cada bacia apresenta condições fisiográficas singulares.

Por fim, considerando o atual estado da arte da temática de inundações, fica clara a contribuição da metodologia proposta, integrando dados fisiográficos e sensoriamento remoto por radar, elaborando um diagnóstico ambiental de áreas de risco na bacia hidrográfica

em questão e podendo servir de guia para a implementação de políticas públicas de prevenção e mitigação de eventos críticos, de planejamento de infraestrutura de controle de cheias e de medidas não estruturais, como sistemas de alerta e planos de contingência.

AGRADECIMENTOS

À ANP, pelo apoio financeiro no primeiro ano da pesquisa

À Thretek, por ter me recebido em sua equipe de trabalho com a condição de eu dedicar parte do meu tempo à esta pesquisa.

À MDA Geoespatial Services, por ter disponibilizado 19 imagens de programação do satélite Radarsat-2.

Aos professores Afonso Araújo e Telma Mendes, ambos acompanharam o desenvolvimento da pesquisa, dedicaram tempo e atenção em vários momentos.

Aos colegas Renato Almeida e Vitor Paiva.

Aos queridos amigos mexicanos: Guadalupe Fuentes, Alejandro Ponce, Roberto Rodrigues e Toledo Sanchez, sempre muito solícitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACREMAN, M.C., SINCLAIR, C.D. Classification of drainage basins according to their physical characteristics and application for flood frequency analysis in Scotland. **Journal of Hydrology**, 84: 365-380, 1986.

BEISL, C. H. **Utilização de mosaicos JERS-1 e da lógica fuzzy para elaboração de mapas de sensibilidade ambiental temporal a derrames de óleo na Amazônia Central**. Tese de D. Sc, UFRJ/COPPE, 196p, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

CARR, J.R., MIRANDA, F.P. The semivariogram in comparison to the co-occurrence matrix for classification of image texture. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 36, P.1945-1952, 1998.

CASTILLO, F. G; ALAVEZ, C. H; FABELA, E. R; GONDI, F. G; CORONA, C. L; PRADO, K. P; RODRIGUEZ, P. M. H; MARTINEZ, J. A; SALMONES, D. G; FARIAS, J. H. **Programa de Desarrollo Urbano de la Zona Metropolitana de Villahermosa-Nacajuca, Tabasco**. Facultad de Arquitectura, Centro de Investigaciones y Estudios de Posgrado,

- Coordinación de Vinculación, Laboratorio de Planeación Urbana Y Regional. Secretaria de Desarrollo Social. Gobierno del Estado de Tabasco Dirección General de Ordenamiento Territorial. 744p. 2008.
- CONGATON, R. G., GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principle and Practices**. Taylor & Francis Group, 200p. 1999.
- DOF - DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN. **Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de las subregiones hidrológicas Alto Grijalva, Medio Grijalva y Bajo Grijalva de la región hidrológica nº 30 Grijalva-Usumacinta**. 52p. Emitido em 5 de abril de 2010 e publicado em 29 de abril de 2010.
- FIGUEIREDO, A. P. S. “Determinação da mancha de inundação do município de Itajubá na enchente de janeiro/2000” In: **Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Belo Horizonte, Brasil, pp.1791-1794, 2003.
- FOODY, G.M. Status of land cover classification accuracy assessment. **Remote Sensing of Environment**. v. 80, p. 185-201, 2002.
- FUCHSHUBER, E. M. **Avaliação de técnicas de classificação automática de dados multi-polarimétricos na banda -L do sensor R99B-SAR para o mapeamento de áreas inundadas no lago de Coari, Amazônia Central**. Dissertação de M. Sc, UFRJ/COPPE, 165p, Rio de Janeiro, RJ, 2011.
- GONÇALVES, F. D; SOUZA FILHO, P. W. M. Integração digital de imagens Radarsat-1 e Landsat-7 para o mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo na Baía de Guajará (Belém- PA). **XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil, pp 1789-1796, 2005.
- HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society America Bulletin**, 56(3): 275-370, 1945.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE) E CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO LEOPOLDO A. MIGUEZ DE MELO (CENPES), **Classificador Textural por Semivariograma (CTS)**. Relatório PETROBRAS/CENPES 650-21365, Rio de Janeiro, 33 P, 1999.
- KELMAN, I. **Physical flood vulnerability of residential properties in coastal, eastern England**. Tese de pós-doutorado, University of Cambridge, UK, 311p. 2002.
- LANDIS, J.; KOCH, G. “The measurement of observer agreement for categorical data”. In: **Biometrics**. 33, pp. 159-174, 1977.
- MACDONALD, J.A. **Automatic classification of satellite images in the textural domain using semivariograms**. Dissertação de mestrado, University of Nevada, Reno, 82p.1991.
- MARCELINO, E. V. **Básicos**. INPE, Santa Maria, 40p. 2007.
- MARKOWSKI, A.S., MANNAN, M.S. Fuzzy Risk Matrix. **Journal of Hazard Materials**. V. 159, pp. 152-157, 2008.
- MIRANDA, F.P; J.A. MAC DONALD; CARR, J.R. Application of the semivariogram textural classifier (STC) for vegetation discrimination using SIR-B data of Borneo, **International Journal of Remote Sensing**, V. 13, pp. 2349-2354. 1992.
- MIRANDA, F.P. CARR, J.R. Application of the semivariogram textural classifier (STC) for vegetation discrimination using SIR-B data of the Guiana Shield, northwestern Brazil. **Remote Sensing Reviews** Volume 10, Issue 1-3, p.155-168. 1994.
- MIRANDA, F.P., FONSECA, L.E.N., BEISL, C.H, ROSENQVIST, A., FIGUEIREDO, M.D.M.A.M. Seasonal mapping of flooding extent in the vicinity of the Balbina Dam (Central Amazonia) using RADARSAT-1 and JERS-1 SAR data. Proceedings of the **International Symposium Geomatics in the Era of RADARSAT (GER'97)** , p.187 – 258. 1997.
- MIRANDA, F.P; FONSECA, L. E. N. Semivariogram textural classification of JERS-1 (Fuyo-1) SAR data obtained over a flooded area of the amazon rainforest. **International Journal**

- of Remote Sensing**. V. 19, n3, pp549-556, 1998.
- MIRANDA, F.P., BEISL, C.H. Seasonal delineation of flooded areas for pipeline management in Amazonia using spaceborne radar data. Proceedings of the **8th International GIS for the Oil & Gas Industry Conference**, Houston, Texas, September . pp. 202. 1999.
- MIRANDA, F.P., MARMOL, A.M.Q., PEDROSO, E.C., BEISL, C.H., WELGAN. P., MORALES, L.M. Analysis of RADARSAT-1 data for offshore monitoring activities in the Cantarell Complex, Gulf of Mexico, using the unsupervised semivariogram textural classifier (USTC). **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, nº 3, p. 424-436, 2004.
- MORISAWA, M.E. Quantitative Geomorphology of Some Watersheds in the Appalachian Plateau. **Geological Society of America Bulletin**, 73: 1025-1046, 1962.
- OLIVEIRA, G. G; SALDANHA, D. L; GUASSELLI, L. A. Espacialização e Análise das Inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Cai/RS. **Geociências**. v. 29 nº 3, pp. 413 – 427, 2010.
- PARADELA, W. R; Santos, A. R; Veneziani, P. Cunha, E. S. P. Radares imageadores nas geociências: Status e perspectivas. **XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil, pp. 1847-1854, 2005.
- POSTHUMUS, H., HEWET C.J.M., MORRIS, J., QUINN, P.F. Agricultural land use and flood risk management: engaging with stakeholders in North Yorkshire. **Agricultural water management** 95, p 787-798, 2008.
- ROTUNNO FILHO, O. C. “Modelo Hidrológico e Sensoriamento Remoto.” In: Magrini, A; Santos, M. A. **Gestão Ambiental de Bacias Hidrográficas**. Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 161 – 193, 2001
- ROVEDDER, J. **Validação da classificação orientada a objeto em imagens de satélite IKONOS II e elaboração de indicadores ambientais georreferenciados no município de Torres, planície costeira do Rio Grande do Sul, Brasil**. Dissertação de M.Sc, CEPSR/UFRGS, Porto Alegre, RS, 93p. 2007.
- SÁNCHEZ, H. M. T. **Fragilidad, vulnerabilidad y riesgo em la cuenca baja del sistema Grijalva-Usumacinta**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil Instituto Politécnico Nacional. Distrito Federal, México, 142p. 2011
- SILVA, I. H. C. **Caracterização da dinâmica de inundações utilizando sistemas orbitais de radar em Villahermosa, México**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil, 151p. 2010.
- SILVA, I. H. C. BEISL, C. H., MIRANDA, F. P., LANDAU, L. System for flooding alert in tropical coastal zones using GIS and remote sensing: a case study in Villahermosa, México. **Journal of Coastal Research**. V.57, pp. 1736 – 1739, 2011.
- SILVA, I. H. C. **Metodologia de avaliação da suscetibilidade a inundações em zonas costeiras tropicais por integração de dados fisiográficos e de sensoriamento remoto por RADAR**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil, 204p. 2015.
- SOUZA, C. R. G. Flooding in the São Sebastião region, northern coast of São Paulo State, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, Brasil, 70 nº 2, pp. 354 – 366, 1998.
- SOUZA, C. R. G. Suscetibilidade Morfométrica de Bacias de Drenagem ao Desenvolvimento de Inundações em Áreas Costeiras. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. Ano 6, nº 1, pp. 45 – 61, 2005
- TOU, J.T., GONZALEZ, R.C. **Pattern Recognition Principles**. Addison-Wesley Publishing Co, 378p. 1974.