

MAPEAMENTO DE ÁREAS SUJEITAS À INUNDAÇÃO PARA PLANEJAMENTO E GESTÃO TERRITORIAL: CARTAS DE SUSCETIBILIDADE, PERIGO E RISCO

*FLOOD MAPPING AREAS FOR LAND USE PLANNING:
SUSCEPTIBILITY, HAZARD AND RISK ZONING*

SOFIA JULIA ALVES MACEDO CAMPOS
Eng., Mestre, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de
São Paulo - IPT, 11-37674432. E-mail: scampos@ipt.br

FAUSTO LUIS STEFANI
Geól., Mestre, IPT, 11-37674934. E-mail: fstefani@ipt.br;

NIVALDO PAULON
Tecg., IPT, 3767-4765. E-mail: niva@ipt.br

LUIZ GUSTAVO FACCINI
Geógr., IPT, 11-37674765. E-mail: lgfaccini@ipt.br

OMAR YAZBEK BITAR
Geól., Dr., IPT, 11-37674489. E-mail: omar@ipt.br

RESUMO ABSTRACT

Este trabalho aborda conceitos relacionados ao mapeamento e elaboração de cartas de suscetibilidade, perigo e risco ao processo hidrológico de inundação fluvial gradual, apresentando a abrangência e aplicação de cada uma das respectivas cartas no contexto de prevenção de desastres naturais frente à expansão urbana e no auxílio ao planejamento e gestão territorial. A partir de revisão bibliográfica, identificam-se os diferentes enfoques e os principais fatores relacionados à elaboração e ao conteúdo das cartas de suscetibilidade, perigo e risco ao processo de inundação fluvial gradual. Os resultados indicam que, de modo geral, os mapeamentos referentes a esse processo aplicam-se a cartas de suscetibilidade, perigo ou risco e têm correspondência com distintos objetivos e escalas de trabalho envolvidas. Assim, para o mapeamento da inundação fluvial gradual, tem-se que a suscetibilidade está mais associada às condições naturais do terreno que favore-

This paper approaches concepts related to mapping and formulation maps of susceptibility, hazard and risk to gradual river flooding hydrologic process, with the scope and application of each map in the prevention of natural disasters in the urban expansion and aid territorial management contexts. From literature review, it shows the different approaches and the main factors related to the preparation and content of susceptibility, hazard and risk maps to gradual flood. The results indicate that, in general, the maps relating to this process apply to susceptibility, hazard or risk have correspondence with different objectives and work scale involved. Thus, to map gradual river flood, it follows that the susceptibility is associated with natural terrain conditions that favor water level rise in the drainage channel with overflow, reaching floodplains and river terraces. Hazard is associated with the event occurrence probability in a given area

cem a elevação do nível d'água no canal de drenagem com transbordamento, atingindo as planícies aluviais e os terraços fluviais. O perigo se associa à probabilidade de ocorrência do evento em determinada área e tempo. Para risco, incorpora-se o uso e ocupação do solo, ponderando-se a vulnerabilidade associada aos danos nas áreas atingíveis. No âmbito de planejamento e ordenamento territorial, busca-se evitar ou mitigar problemas e potencializar ações necessárias. A gestão se configura como a efetivação das condições e requisitos que o planejamento realizado ajudou a elaborar. Assim, o tipo de carta depende do objetivo, podendo ser planejamento ou gestão, bem como da escala, que pode ser de detalhe, semidetalhe ou regional e, ainda, de suas possíveis aplicações. Apresentam-se e discutem-se os principais métodos para elaboração dessas cartas.

Palavras-chave: processo hidrológico; inundação fluvial gradual; carta de suscetibilidade; carta de perigo, carta de risco.

1 INTRODUÇÃO

O mapeamento de áreas sujeitas a inundações reveste-se de extrema importância no planejamento territorial, particularmente sob a perspectiva de subsidiar a prevenção de desastres naturais frente à expansão urbana, assim como auxiliar na gestão das áreas ocupadas. Existem áreas naturalmente sujeitas à inundação, compreendendo o leito menor e o leito maior dos rios e que, com determinada periodicidade, são atingidas pelas águas. Entretanto, a impermeabilização gerada pela urbanização altera as condições de escoamento natural nos terrenos, diminuindo o tempo de concentração nas bacias de drenagem, aumentando progressivamente as vazões e os danos ocasionados pelas inundações. Nesse contexto, merece destaque a utilização diferenciada dos termos suscetibilidade, perigo e risco quando da solicitação e/ou elaboração de cartas para planejamento ou gestão territorial, tanto por técnicos quanto por gestores públicos, muitas vezes sem o devido entendimento do alcance de cada um desses instrumentos.

O mapeamento de áreas sujeitas à inundação fluvial gradual envolve uma temática abrangente e sem fórmulas definitivas, podendo-se empregar duas abordagens dependendo da aplicação pretendida. A primeira envolve análises descritivo-

and time. Risk incorporates the use and occupation, considering the vulnerability associated with damage to the achievable areas. As part of territorial planning, we seek to avoid or mitigate problems and extend necessary actions. The management is configured as the fulfillment of the conditions the planning done in the past helped to build. The map type depends on the purpose that may be planning or management, as well as the scale, which can be of detail, intermediate detail or regional, and also of their possible applications. The main methods to the elaboration of these maps are discussed.

Keywords: hydrologic process; gradual river flooding; susceptibility map; hazard map, risk map.

quantitativas dos múltiplos aspectos de um determinado ambiente, como o tipo de solo, a conformação do relevo e a influência da cobertura vegetal. A segunda, associada às engenharias, envolve conceitos de hidrologia e hidráulica, com elaboração de modelos chuva-vazão e simulação do comportamento dos escoamentos. Assim, cada carta está diretamente relacionada a seus objetivos, o que também determina a abordagem adotada para sua elaboração.

2 OBJETIVOS, MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho objetiva sintetizar os resultados de levantamentos, análises e discussões acerca de conceitos básicos relacionados ao mapeamento de suscetibilidade, perigo e risco ao processo hidrológico de inundação fluvial gradual e apresentar algumas cartas típicas para cada uma das abordagens, considerando a variedade de perspectivas de diferentes campos de conhecimento. Visa também analisar a abrangência e aplicação de cada uma das correspondentes cartas geradas no contexto de prevenção de desastres naturais frente à expansão urbana e no auxílio à gestão territorial.

O trabalho se fundamenta em revisão bibliográfica, na qual se busca identificar os principais fatores relacionados a cada uma dessas cartas para o estudo do processo hidrológico e hidráulico

da inundação fluvial gradual. Utilizam-se, ainda, resultados de experiências práticas na elaboração de cartas de suscetibilidade em municípios, considerando a interação com técnicos das prefeituras, tendo em conta os trabalhos relatados em Bitar (2014). Associam-se, para fins de análise, as tipologias de cartas aos diferentes instrumentos de planejamento e gestão territorial que as demandaram, bem como se verificam as escalas de mapeamento geralmente utilizadas e as possíveis aplicações dos produtos gerados em mapeamentos executados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De uma maneira geral, sobretudo em bacias hidrográficas rurais, parte das águas pluviais é retida pela cobertura vegetal, outra parte infiltra-se no subsolo e o restante tende a escoar sobre a superfície de forma gradual, produzindo um hidrograma com variação lenta de vazão e com picos de enchentes moderados. As enchentes naturais extravasam a calha menor ocupando o leito maior dos rios com certa periodicidade. Conhecidos os processos e suas consequências, é necessário planejar a ocupação do espaço urbano com infraestrutura e condições que possam evitar impactos econômicos e sociais.

É imprescindível considerar que a existência de perigos naturais é uma função do ajustamento humano a eles, posto que sempre envolvam iniciativa e decisão humana, ou seja, em princípio, “enchentes não seriam danosas se o homem evitasse as planícies de inundação” (MONTEIRO, 1991, p. 08).

A ocorrência de uma inundação é o resultado de vários fatores que interferem na formação dos escoamentos e em sua propagação ao longo da bacia hidrográfica de contribuição (PINHEIRO, 2007). Os fatores que se interrelacionam e são responsáveis pela ocorrência de eventos de inundação podem ser divididos em: *transitórios*, associados à ocorrência de chuvas, taxas de evapotranspiração e grau de saturação do solo; *permanentes*, que correspondem às características morfométricas da bacia de drenagem e à geologia; e *mistos*, que estão relacionados ao tipo de uso e ocupação do solo (COOKE e DOORNKAMP, 1990).

Pode-se, então, afirmar que o mapeamento de áreas suscetíveis a inundações graduais apoia-se

nos fatores permanentes, ou seja, nas condições predisponentes dos terrenos, principalmente nas características geológicas, topográficas e morfológicas das bacias que tendem a favorecer o transbordamento do nível d'água, por ocasião de chuvas intensas. Quando se considera os fatores transitórios, ou seja, associados à ocorrência de chuvas, associa-se a probabilidade de ocorrência, tratando-se de carta de perigo de inundação ou, ainda, carta de aptidão à urbanização. E, considerando os fatores mistos, que se relacionam ao tipo de uso e ocupação do solo, considera-se, além do perigo, a vulnerabilidade e os possíveis danos associados e, assim, trata-se de carta de risco.

Segundo Monteiro e Kobiyama (2013), há uma diferenciação entre mapa de inundação, mapa de perigo de inundação e mapa de risco de inundação. O mapa de inundação consiste na delimitação das áreas inundadas com a altura da lâmina de água. Este está atrelado a um único período de retorno. De acordo com Moel et al. (2009, *apud* Monteiro e Kobiyama, 2013), o mapa de perigo de inundação contém informações sobre a probabilidade e/ou magnitude de um evento, enquanto o mapa de risco contém informações adicionais sobre as consequências (danos econômicos, pessoas afetadas). Assim, mapas de suscetibilidade a inundação são utilizados para a criação do mapa de perigo de inundação que, junto com fatores de vulnerabilidade e de danos prováveis, é utilizado para criar o mapa de risco de inundação.

3.1 Planejamento e gestão urbana

Segundo Cardoso (2014) há que se esclarecer que planejamento e gestão são conceitos complementares. Planejar remete ao futuro, significando tentar prever a evolução de um fenômeno ou, ainda, tentar simular os desdobramentos de um processo, com o objetivo de melhor prevenir-se em relação a prováveis problemas ou, inversamente, com o intuito de maximizar ou potencializar prováveis benefícios. Por sua vez, gestão trata do presente, significando administrar uma situação dentro dos marcos dos recursos disponíveis e tendo em vista as necessidades imediatas. Noutros termos, o planejamento é a preparação para a gestão futura, buscando-se evitar ou mitigar problemas, enquanto a gestão é a efetivação prática e atual

das condições que o planejamento realizado no passado ajudou a construir.

Duarte (2007) conceitua planejamento como um processo cujo resultado, sempre parcial, é o plano. O plano tem partes; o planejamento, etapas. Essas etapas são: diagnóstico; prognóstico; propostas e gestão urbana. Dentre essas partes, a gestão urbana é um conjunto de instrumentos, atividades, tarefas e funções que visam a assegurar o bom funcionamento de uma cidade.

Assim, segundo essas definições, simplificada, o planejamento representaria os cenários de urbanização possíveis de implantar analisando-se como situação inicial a condição natural dos terrenos aos processos de dinâmica superficial, particularmente os hidrológicos e, considerando o planejamento para ocupação urbana, ainda, as probabilidades ou perigo de ocorrência das inundações nos locais a urbanizar. O mapeamento de riscos seria então um dos instrumentos de gestão urbana para assegurar a redução de impactos econômicos e sociais, por meio de zoneamento, quando as áreas já estão ocupadas. O zoneamento propriamente dito é a definição de um conjunto de regras para a ocupação das áreas de risco de inundação, visando à minimização

futura das perdas materiais e humanas em face das grandes cheias.

3.2 Escala de trabalho

A escala de trabalho está diretamente relacionada com os objetivos do produto a ser gerado. A medida que o detalhamento aumenta, são necessárias análises e ferramentas diferenciadas. A escala tem grande importância, pois, à medida que se aproxima de uma análise de risco, ou seja, quando há necessidade de avaliar danos em áreas ocupadas, há necessidade de pormenores. Assim, seria inapropriado elaborar mapa de riscos em escalas regionais ou de semidetalhe, sendo necessárias escalas de detalhe, ou seja, escala próxima da de projeto (1:2.000 ou maior). Contudo, na prática, muitas vezes a escala de trabalho pode ser controlada pela escala dos mapas topográficos ou bases disponíveis. Fell et al. (2008) apresentam escalas de mapeamento recomendadas, de acordo com os objetivos, para deslizamentos. Para inundações graduais, pode-se propor uma análise semelhante, conforme discutido em Campos et al. (2015) e apresentado na (Figura 1).

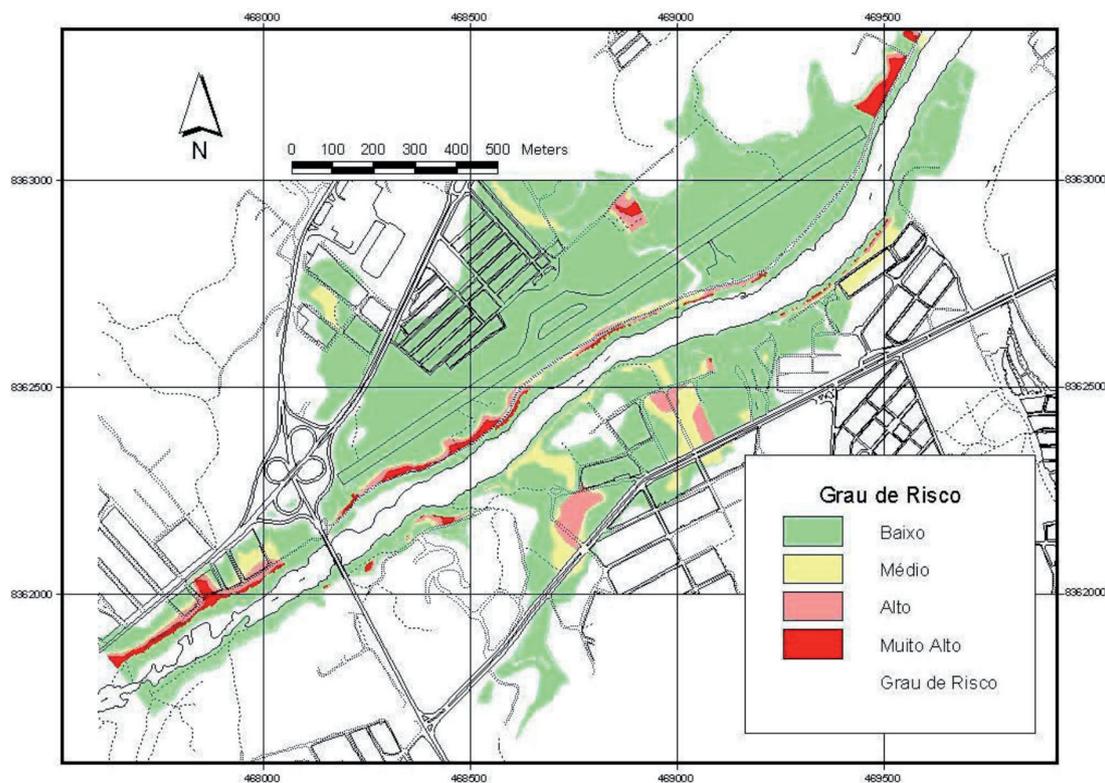


Figura 1 – Variáveis no mapeamento e zoneamento de inundações fluviais graduais, de acordo com os tipos de zoneamento. (Fonte: Campos et al., 2015)

3.3 Aplicação das cartas

As cartas de suscetibilidade e perigo podem auxiliar no planejamento da expansão urbana uma vez que possibilitam antever, no primeiro caso, terrenos naturalmente suscetíveis à inundação, por se localizarem em cotas baixas e próximas aos canais ou pontos de acúmulo de água e, no segundo caso, manchas de inundação associadas a um período de retorno (probabilidade de ocorrência), associando-se também as condições hidrodinâmicas de escoamento nos canais. As modelagens hidrológicas e hidráulicas utilizadas nas cartas de perigo, com elaboração de modelos chuva-vazão e simulação do comportamento dos escoamentos, por meio de análise unidimensional ou bidimensional no canal e planície de inundação, propiciam, após calibração, análises de cenário de ocupação na bacia, assim como a previsão de impacto de instalação de obras de macrodrenagem, considerando-se a probabilidade de ocorrência do evento.

As cartas de risco são instrumentos para gestão urbana. Segundo Andjelkovic (2001), pode-se iniciar a construção de estruturas que previnam os danos, alertar atuais e futuros proprietários de terras sujeitas às inundações, bem como auxiliar as autoridades e tomadores de decisões a desenvolver novas ideias de desenvolvimento sustentável para estas áreas. Shidawara (1999) argumenta que os mapas de risco possuem um grande papel no sistema de prevenção de inundação, pois em municípios pequenos e com poucos recursos econômicos torna-se muito difícil a implantação de

sistemas mais sofisticados, como monitoramento e sistemas de alerta.

3.4 Cartas de suscetibilidade, perigo e risco à inundação

A partir dos conceitos discutidos, apresenta-se o conteúdo e principais métodos adotados para a elaboração das cartas de suscetibilidade, perigo e risco à inundação.

3.4.1 Carta de suscetibilidade

Segundo Bitar (2014), a suscetibilidade ou a propensão ao desenvolvimento de um processo em uma dada área, quanto à inundação fluvial gradual, pode ser mapeada de acordo com as seguintes atividades: abordagem quantitativa baseada em índices morfométricos; definição da área de estudo para aplicação dos índices morfométricos segundo a bacia hidrográfica do rio principal em que o município se insere; hierarquização relativizada na bacia hidrográfica quanto à suscetibilidade a inundações de cada uma das sub-bacias contribuintes (ETAPA 1); espacialização da inundação a partir de altura de lâmina d'água em relação à drenagem mais próxima (ETAPA 2), e integração e recorte na área que abrange o conjunto do território formado por planícies e terraços fluviais e/ou marinhos (ETAPA 3). Os procedimentos de análise e classificação consistem de três etapas básicas, conforme apresentado na Figura 2.

Variáveis	Tipo de zoneamento		
	Suscetibilidade	Perigo	Risco
Dados básicos	Fatores permanentes; condições predisponentes dos terrenos	Fatores transitórios, associados à ocorrência de chuvas; considera a probabilidade de ocorrência do evento num determinado período de tempo	Fatores transitórios, associados à ocorrência de chuvas; considera a probabilidade de ocorrência do evento num determinado período de tempo e o uso e ocupação da área
Informações esperadas	Delimitação das áreas inundadas com a altura da lâmina de água	Delimitação das áreas inundadas associadas à probabilidade e/ou magnitude de um evento	Delimitação das áreas inundadas associadas à probabilidade de ocorrência e informações adicionais sobre as consequências (danos econômicos, número de pessoas afetadas)
Aplicações	Planejamento da expansão urbana; subsidiar tomadores de decisões e público em geral	Planejamento com vistas a parcelamento de solo; zoneamento para projeto de construção de estruturas de engenharia de grande porte	Gestão urbana
Escala	1:25.000 até 1:250.000 (regional)	1:5.000 até 1:25.000 (semidetalhe)	1:5.000 até 1:1.000 ou maior (detalhe)

Figura 2 – Fluxograma das três etapas básicas executadas para fins de análise, classificação e zoneamento da suscetibilidade a inundações. (Fonte: Bitar, 2014)

A análise morfométrica de bacias hidrográficas (ETAPA 1) pode ser definida como a “análise quantitativa das interações entre a fisiografia e a sua dinâmica hidrológica” que propicia um conhecimento da dinâmica fluvial, bem como das relações existentes entre essa dinâmica e os diversos componentes do meio físico e biótico de uma bacia. Analisam-se parâmetros dos terrenos que evidenciam ou favorecem a ocorrência das inundações graduais. O procedimento é executado de forma relativa, hierarquizando, em vista das bacias analisadas, aquelas que possuem maior ou menor grau de suscetibilidade. A Figura 3 apresenta os parâmetros e índices selecionados e extraídos para cada uma das sub-bacias que compõem a bacia hidrográfica em que o território municipal em análise se insere. Os valores correspondentes aos parâmetros são normalizados para fins de comparação de grandeza e elaboração de um índice geral que propicie avaliar a influência de cada sub-bacia na ocorrência de inundações tal que se estabeleça a ordem de grandeza de cada parâmetro ou índice em uma

escala variável entre 1 (menor suscetibilidade) e 5 (maior suscetibilidade).

Para a espacialização da inundação nas planícies e terraços (ETAPA 2), utiliza-se o modelo HAND (Height Above the Nearest Drainage), desenvolvido por Rennó et al. (2008), que mede a diferença altimétrica entre qualquer ponto da grade do MDE e o respectivo ponto de escoamento na drenagem mais próxima, considerando a trajetória superficial de fluxo (flowpath) que liga topologicamente os pontos da superfície com a rede de drenagem. O resultado é uma grade que representa a normalização do modelo digital de elevação (MDE) em relação à drenagem e indica a área onde uma cheia pode se desenvolver, em caso de haver água em excesso fluindo na superfície (PIRES e BORMA, 2013). Esse modelo apresenta locais mais suscetíveis à inundação por estarem em posições altimétricas mais próximas a uma provável linha de fluxo. O modelo, entretanto, não considera as condições hidrodinâmicas do escoamento que também podem gerar inundações.

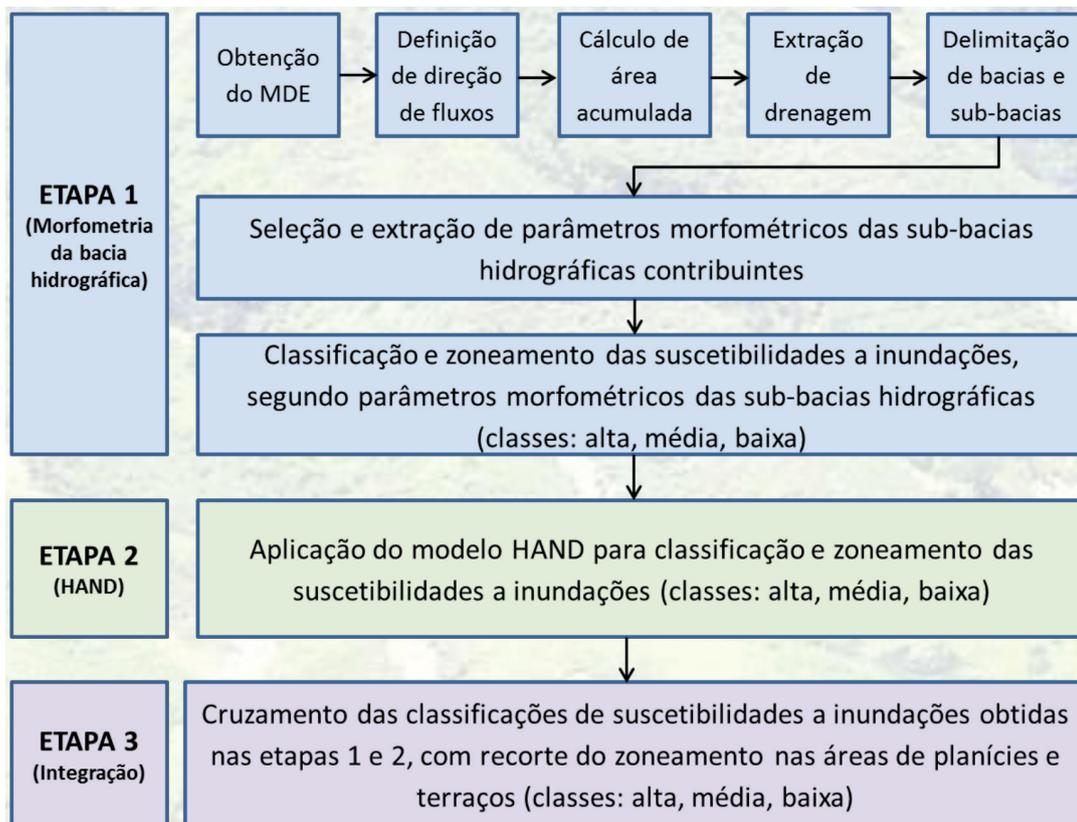


Figura 3 - Parâmetros e índices morfométricos selecionados, contendo referência, modo de cálculo e influência possível acerca da suscetibilidade a inundações. (Fonte: Bitar, 2014)

Após a geração do modelo HAND, procede-se ao fatiamento, ou seja, à escolha das elevações (ou alturas) acima do nível médio da drenagem para as quais serão atribuídos os patamares ou classes de suscetibilidade. Com base nas condições geomorfológicas e pedológicas dos terrenos

atribuem-se as seguintes classes: **Alta** a partir do nível normal da drenagem até o início do baixo terraço (englobando a planície aluvial atual); **Média** do início do baixo terraço até o início do alto terraço; e **Baixa** a partir do início do alto terraço, conforme Figura 4.

Parâmetro/índice	Cálculo	Influência
Área de contribuição (Ac)	Extração automática em SIG	Associa-se ao volume de água que atinge o rio principal. Quanto maior Ac, maior tende a ser a suscetibilidade
Relação de relevo (Rr) (SCHUMM, 1956)	Relação entre amplitude (Δa) e comprimento do rio principal da sub-bacia (L); $Rr = \Delta a/L$	Indica velocidade de escoamento. Quanto maior Rr, mais rápido tende a ser o fluxo, reduzindo o acúmulo de água na sub-bacia
Densidade de drenagem (Dd) (HORTON, 1945)	Relação entre comprimento da drenagem (C) c/ área da sub-bacia (A); $Dd = C/A$	Quanto maior Dd, menor é infiltração de água no solo e maior tende a ser a velocidade com que a água atinge o rio
Índice de circularidade (Ic) (MÜLLER, 1953)	Relação entre a área da sub-bacia (A) e a de um círculo de mesmo perímetro (Ac); $Ic = A/Ac$	Quanto maior é o Ic, maior tende a ser a retenção de água na sub-bacia, reduzindo a velocidade de chegada da água no rio
Índice de sinuosidade (Is) (SCHUMM, 1963)	Relação entre o comprimento do canal principal (L) com a distância vetorial entre os extremos do canal (dv); $Is = L/dv$	Quanto maior o Is, menor tende a ser a velocidade do escoamento e chegada da água no rio

Figura 4 – Classes de fatiamento adotadas no âmbito da aplicação do modelo HAND em planícies e terraços a partir das condições geomorfológicas e pedológicas. (Fonte: Bitar, 2014)

Esses valores, inicialmente atribuídos por meio de análise de seções transversais típicas ao longo das drenagens principais, são avaliados e validados com os trabalhos de campo, incluindo-se a verificação mediante levantamento de perfis topográficos e de dados a respeito de marcas e registros de inundações anteriores, quando disponíveis nos municípios mapeados e, ainda, informações de relatos de moradores locais nas áreas afetadas. Também podem ser elaboradas sondagens a trado para verificar os tipos de solo característicos.

A integração dos resultados obtidos nas Etapas 1 e 2, compreende o cruzamento entre o grau de suscetibilidade calculado por sub-bacia hidrográfica (ETAPA 1) e os resultados do HAND (ETAPA 2). A operação é realizada por meio da lógica booleana, comumente utilizada para a identificação de relações entre distintos tipos de dados geográficos (identificadas por meio de sobreposição de temas ou de mapas temáticos), de acordo com a matriz de correlação indicada na Figura 5, efetuando-se, nos cruzamentos (ETAPA 3), adaptação em favor de um maior equilíbrio

entre as classes resultantes. A Figura 6 apresenta a Carta de Suscetibilidade do município de Ilhota em Santa Catarina.

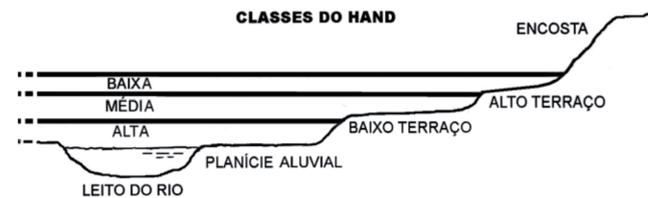


Figura 5 – Matriz de correlação entre as duas classificações de suscetibilidade obtidas, segundo os índices morfométricos e o modelo HAND.

Modelo HAND \ Índices Morfométricos	Alta	Média	Baixa
Alta	Alta	Alta	Média
Média	Alta	Média	Baixa
Baixa	Média	Baixa	Baixa

Figura 6 – Carta de Suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação para o município de Ilhota - SC. (Fonte: Bitar, 2014).

3.4.2 Cartas de Perigo e Risco

Segundo Tucci (2005), os mapas de inundação de cidades são de dois tipos: mapas de planejamento e mapas de alerta. Os mapas de planejamento definem as áreas que podem ser atingidas por cheias de tempo de retorno escolhidos. Enquanto que os mapas de alerta são preparados com valores de cotas em cada esquina da área de risco permitindo o acompanhamento da enchente por parte dos moradores, com base nas observações do nível de água em relação às réguas pré-instaladas. Uniformizando os conceitos discutidos, os mapas de suscetibilidade e perigo seriam os de planejamento e os mapas de risco, os de alerta, ou seja, de gestão.

Conforme destacado por Monteiro e Kobiyama (2013), o mapa de inundação pode ser criado de duas maneiras diferentes, por meio da confecção de uma mancha de inundação a partir de dados observados da inundação ou por meio da modelagem hidrodinâmica. O primeiro método fornece um mapa com mais exatidão, porém é de difícil criação, pois os dados precisam ser adquiridos em pleno evento de inundação. Como ponto negativo tem-se a inflexibilidade em criar mapas com períodos de retorno pré-estabelecidos. No segundo método, referente à modelagem hidrodinâmica, utilizam-se modelos físicos ou matemáticos para a criação dos mapas de inundação, sendo necessário, para a calibração e validação do modelo hidrodinâmico, a utilização de cotas do evento de inundação. Neste segundo, o mapa de inundação sempre está relacionado a um período de retorno que é utilizado diretamente na confecção do mapa de perigo. A qualidade do mapa depende da qualidade dos procedimentos que o antecedem, e é muito sensível ao modelo digital de terreno (MONTEIRO; KOBİYAMA, 2013).

Objetivando ações para planejamento, principalmente frente à expansão urbana, faz-se necessário prever as possíveis áreas atingidas para várias chuvas ou períodos de retorno, sendo mais recomendado utilizar a abordagem da modelagem hidrodinâmica.

Para delimitar as áreas atingidas em cada período de retorno (TR), a modelagem matemática é realizada por meio de simulações hidrológicas e hidrodinâmicas, em escala de maior detalhe.

Segundo Monteiro e Kobiyama (2013), a bacia de estudo deve ser dividida em: sub-bacias de contribuição (BCs) e área inundável (AI). As simulações hidrológicas são realizadas para as BCs e as hidrodinâmicas para a AI. As BCs são diferenciadas da AI pelo elevado potencial de inundação que a segunda possui. Isto ocorre por causa da grande declividade média dos rios principais das BCs e por estas serem bacias de cabeceira. Como auxílio para esta diferenciação, deve-se realizar visitas de campo e obter informações em entrevistas com moradores. As áreas que constituírem o mapa de inundação não podem ser consideradas como BCs. Os mapas de perigo são confeccionados apenas para a AI, visto que não há necessidade deste estudo nas BCs.

Cabe destacar que algumas vezes as BCs podem estar associadas ao processo de enxurrada ou inundação rápida (flash flood). Independente do modelo matemático a ser utilizado, este deve ser sempre calibrado e validado para o local e condições do problema.

O conceito de perigo relaciona-se com a probabilidade de ocorrência do processo ou evento num dado período de tempo na AI. Assim, relaciona-se com os fatores transitórios, ou seja, a chuva e a sua distribuição temporal na bacia, passíveis de análise estatística.

Monteiro e Kobiyama (2013) propõem quantificar o perigo pois existem diferentes níveis de perigo que podem causar diferentes tipos de dano. O mapa de perigo é apresentado em função da frequência de inundação (período de retorno) e intensidade (índice de perigo), conforme "Equação (1)". O índice de perigo (IP) proposto por Stephenson (2002) corresponde ao produto da profundidade ou altura de inundação em metros (h) e da velocidade do escoamento em m/s (v) tal que:

$$IP = h.v \quad (1)$$

Assim, este índice apresenta-se diretamente relacionado à energia do escoamento, ou seja, ao seu potencial destrutivo, tendo sido criado para indicar locais mais adequados para o desenvolvimento urbano.

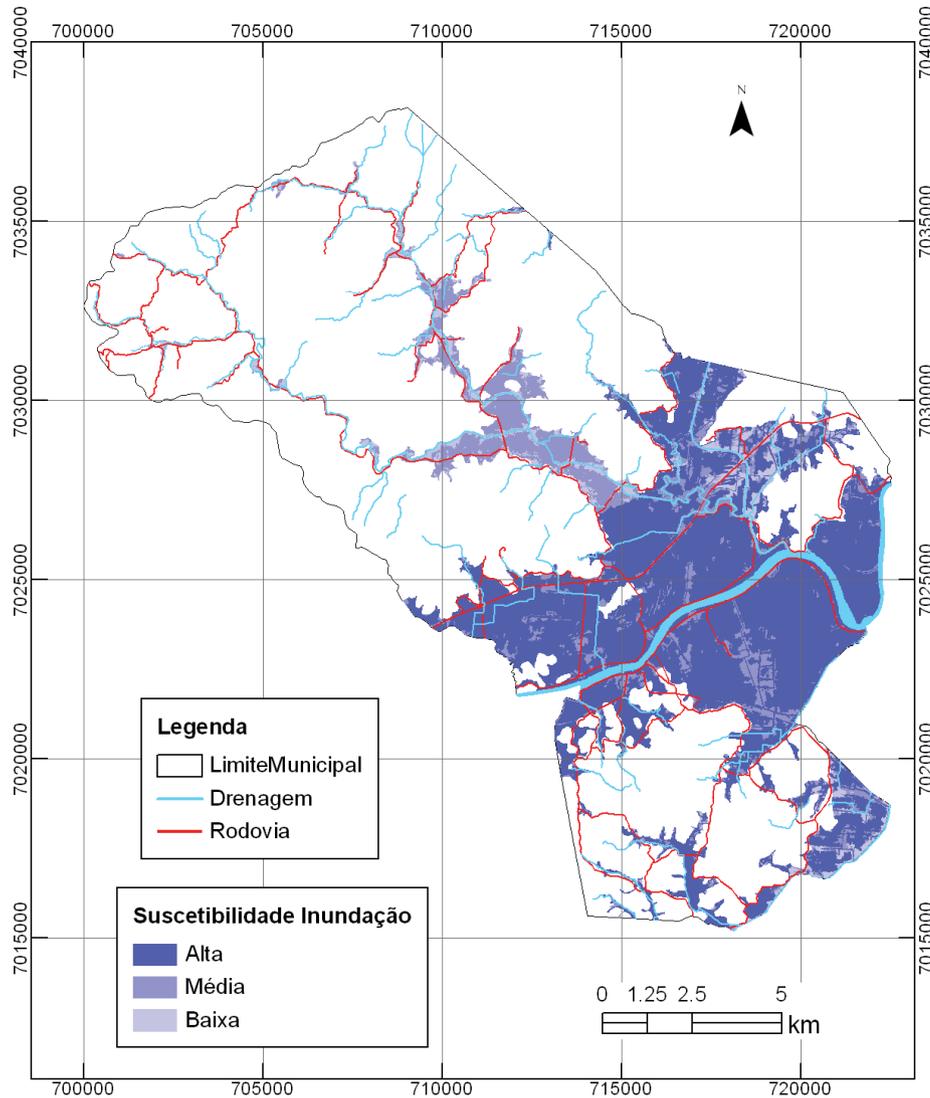


Figura 7 – Níveis de Perigo Discretizado representando Intensidade (IP) x Probabilidade (TR) (Fonte: Prevene, 2001 *apud* Monteiro e Kobiyama 2013).

Para adequar o método à realidade brasileira, onde precipitações com alta intensidade ocorrem com uma frequência elevada, adotam-se os períodos de retorno de 5, 20 e 100 anos. Monteiro e Kobiyama (2013) identificaram que os níveis de perigo são da seguinte maneira: 3 para Perigo Alto (vermelho); 2 para Perigo Médio (laranja); 1 para Perigo Pequeno (amarelo) e 0 para Perigo Inexistente (sem cor). Foram observadas as participações das BCs na área do mapeamento de perigo, quanto à alteração da área e volume inundados. Segundo esses autores, as sub-bacias que possuem vazão de pico menor do que $2\text{m}^3/\text{s}$ para o período de retorno de 5 anos e menor do que $5\text{m}^3/\text{s}$ para o período de retorno de 100 anos são consideradas

de baixa importância, uma vez que despreza-se o efeito da sinergia das vazões de contribuição.

Os autores também destacam que para a localização de vias de transporte não se deve adotar nenhum perigo como aceitável, pois em casos de desastres naturais estas devem estar sempre acessíveis para a evacuação de pessoas. As obras de importância pública, como hospitais e escolas, devem ser localizadas em áreas onde existe, no máximo, o perigo baixo. Obras, como parques para lazer, que são utilizadas apenas quando não existe ocorrência da precipitação, podem ser construídas aceitando o perigo alto, desde que após um evento de inundação estes locais sejam reconstituídos. As demais obras devem ser realizadas aceitando o

perigo médio, mas sempre tentando reduzir este ao máximo. A Figura 8 apresenta o mapa de perigo confeccionado por Monteiro e Kobayama (2013) para uma sub-bacia no braço do rio Baú, no município de Ilhota.

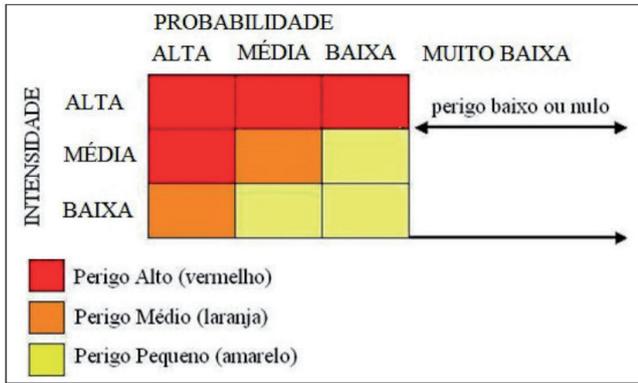


Figura 8 - Ilustração do Mapa de Perigo de Inundação uma bacia de drenagem em Ilhota - SC (Fonte: Monteiro e Kobayama, 2013)

Segundo Westen et al. (2006), uma das melhores definições conceitua o risco decorrente do número previsto de vidas perdidas, de pessoas feridas e desestabilização de atividades econômicas, devido a um fenômeno particular corrente em uma área em um dado período. O risco implica a proximidade de um dano ou adversidade o que pode afetar a vida dos homens. Não existe risco sem que uma população ou indivíduo que o perceba e que poderia sofrer com seus efeitos (VEYRET, 2007). Para Westen et al. (2006) a definição genérica de risco pode ser esquematicamente representado pela seguinte fórmula “Equação(2)”:

$$\text{Risco} = \Sigma (H \Sigma (V * A)) \quad (2)$$

Onde:

H é representado pelo perigo expresso em função da probabilidade da ocorrência dentro de um período de frequência;

V representa a vulnerabilidade física dos elementos que estão expostos ao risco, sendo atribuído um valor (0 a 1) para cada elemento; e **A** significa os danos causados aos elementos que estão em risco.

Aplicando-se a definição do risco aos principais atributos identificados em áreas ocupadas,

conforme apresentado por Hora e Gomes (2009), quanto à inundação, tem-se a “Equação (3)”:

$$\text{Risco à inundação} = S (TR) * \{ (\text{Vulnerabilidade da Tipologia}) * [((\text{Altura de Inundação} * P1) + (\text{Densidade Populacional} * P2) + (\text{Densidade de Habitações} * P3)) / S P] \} \quad (3)$$

Onde:

(TR) é tempo de retorno (anos) das inundações representado pelas probabilidades:

TR2 = 0,5; TR5 = 0,2; TR10 = 0,1; TR20 = 0,05; TR50 = 0,02 e TR100 = 0,01;

(Vulnerabilidade da Tipologia) é vulnerabilidade das tipologias habitacionais, onde para cada tipo de tipologia foi atribuído um valor de vulnerabilidade;

(Altura da Inundação) correlaciona-se aos danos associados à altura da lâmina d’água;

(Densidade Populacional) são os valores de densidade populacional obtidos das análises; e

(Densidade habitacional) são os valores de densidade habitacional obtidos das análises.

Os valores P1, P2 e P3 são pesos atribuídos aos valores de Altura de Inundação, Densidade Populacional e Densidade Habitacional, respectivamente, 2, 5 e 3.

O método para determinação do risco à inundação proposto por Hora e Gomes (2009) é apresentado no diagrama da Figura 9.

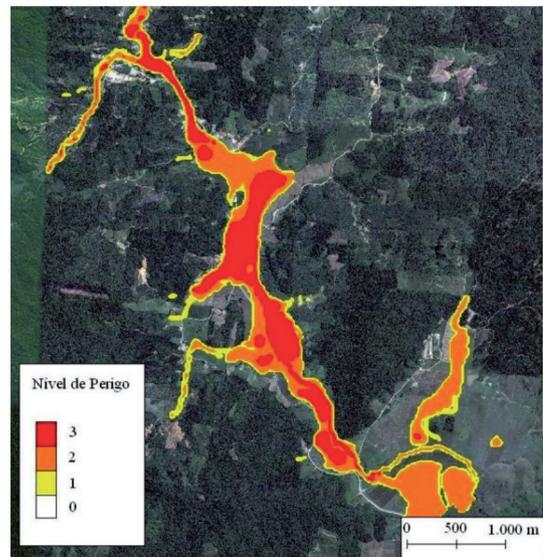


Figura 9 - Diagrama para elaboração do grau de risco à inundação (Fonte: Hora e Gomes, 2009)

Hora e Gomes (2009) apresentam um estudo de caso da cidade de Itabuna-BA, em área que abrange um polígono de 1,72km², localizado na porção sudoeste, que engloba trecho do rio Cachoeira de aproximadamente 2000m de extensão. Dentro desta área localizam-se aglomerados subnormais, ocupações estas reconhecidamente suscetíveis aos fenômenos de inundação do rio (Figura 10).

Conforme o método proposto, quanto ao uso e ocupação elabora-se o levantamento de

distribuição das tipologias de uso e ocupação do solo na área de estudo, ou seja, em escala de detalhe (1:2000 ou maior), conforme Figura 11.

Para a definição das cotas de inundação na área em estudo, associadas aos diferentes tempos de recorrências de cheias, Hora e Gomes (2009) utilizaram os dados de duas seções transversais ao rio, adotando as cotas que representam a média dos valores correspondentes a estas duas seções.

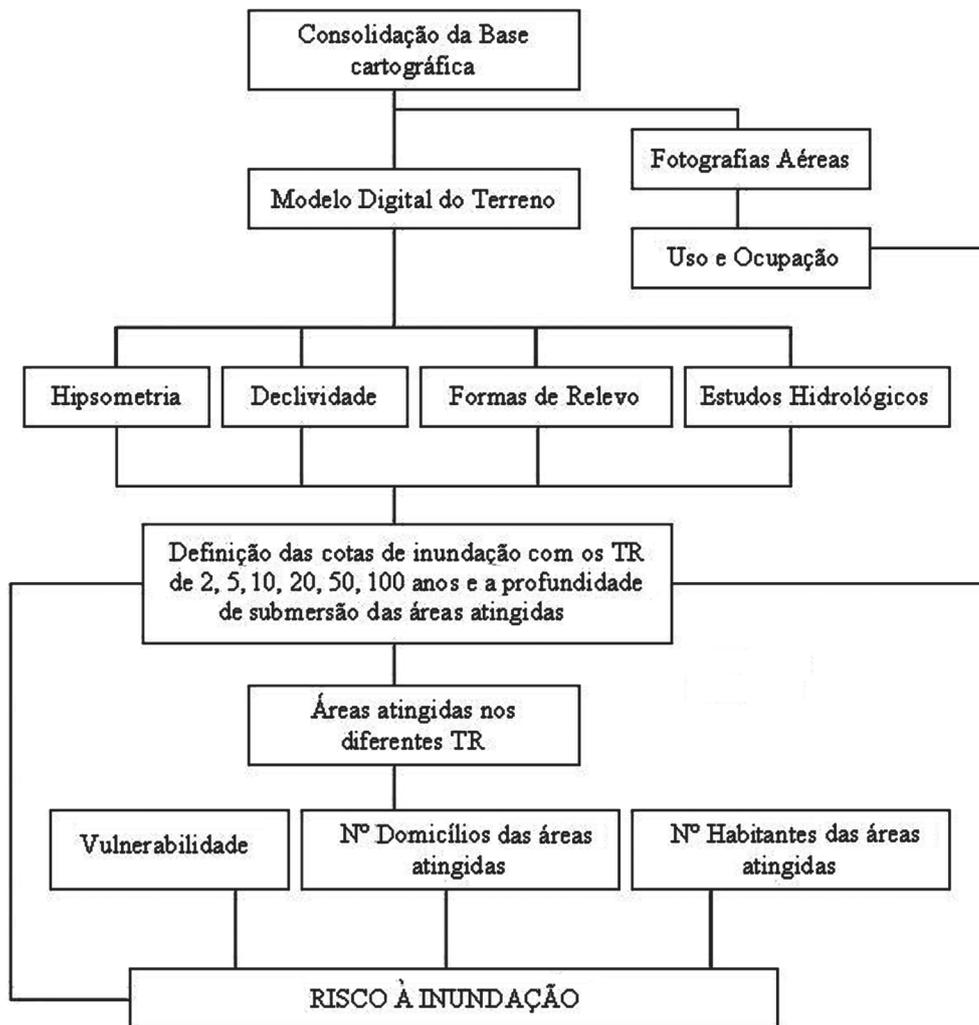


Figura 10 – Localização da área de estudo e ocupação em Itabuna, BA (Fonte: Hora e Gomes, 2009)



Figura 11 - Distribuição dos diferentes tipos de uso e ocupação do solo na área de estudo (Fonte: Hora e Gomes, 2009)

Por meio do conhecimento das cotas de inundação nos diferentes tempos de recorrência e da conformação do relevo obtido do modelo digital do terreno (MDT) da área em estudo, obtém-se a distribuição das profundidades de inundação, ou seja, os dados são obtidos por meio da diminuição dos valores das cotas pelos valores da hipsometria.

A estimativa do número de residências e habitantes das áreas atingidas pelas inundações é gerada a partir da observação dos valores dos dados referentes aos setores censitários do IBGE. Dessa maneira, a partir da análise de cada setor,

chega-se a uma média que retrata a sua densidade habitacional e populacional. Com relação à densidade habitacional na área estudada pelos autores citados, os valores variam de 300 a 3.000 domicílios/km², já para a densidade populacional, os dados variam de 6.300 a 12.000 habitantes/km². Por meio dos valores de densidade calculados para a área de estudo, estima-se a quantidade de domicílios e pessoas que são atingidas pelas cheias do rio Cachoeira para cada tipo de uso e ocupação e em cada tempo de recorrência das inundações (Tabela 1).

Tabela 1 - Quantidade estimada de domicílios e habitantes atingidos pelas cheias (Hora e Gomes, 2013)

Uso e ocupação	Tempo de recorrência (anos)											
	2		5		10		20		50		100	
	Nº (D)	Nº (H)	Nº (D)	Nº (H)	Nº (D)	Nº (H)	Nº (D)	Nº (H)	Nº (D)	Nº (H)	Nº (D)	Nº (H)
Área consolidada	6	24	58	230	174	700	258	1.033	515	2.059	793	3.172
Área subnormal	27	84	63	198	90	285	105	629	126	397	145	459
Área com. em estágio inicial	3	14	8	31	10	40	12	48	16	62	18	73
Área sub. em expansão	2	7	9	28	12	37	14	45	26	82	32	102
População relocada	13	46	16	58	17	63	19	67	20	73	21	76
TOTAL	51	175	154	545	303	1.125	408	1.822	703	2.673	1.009	3.882

Obs: (D) = número de domicílios e (H) = número de habitantes.

O resultado do emprego da Equação (3) na área em estudo é a geração do Mapa de Risco à Inundação (Figura 12).

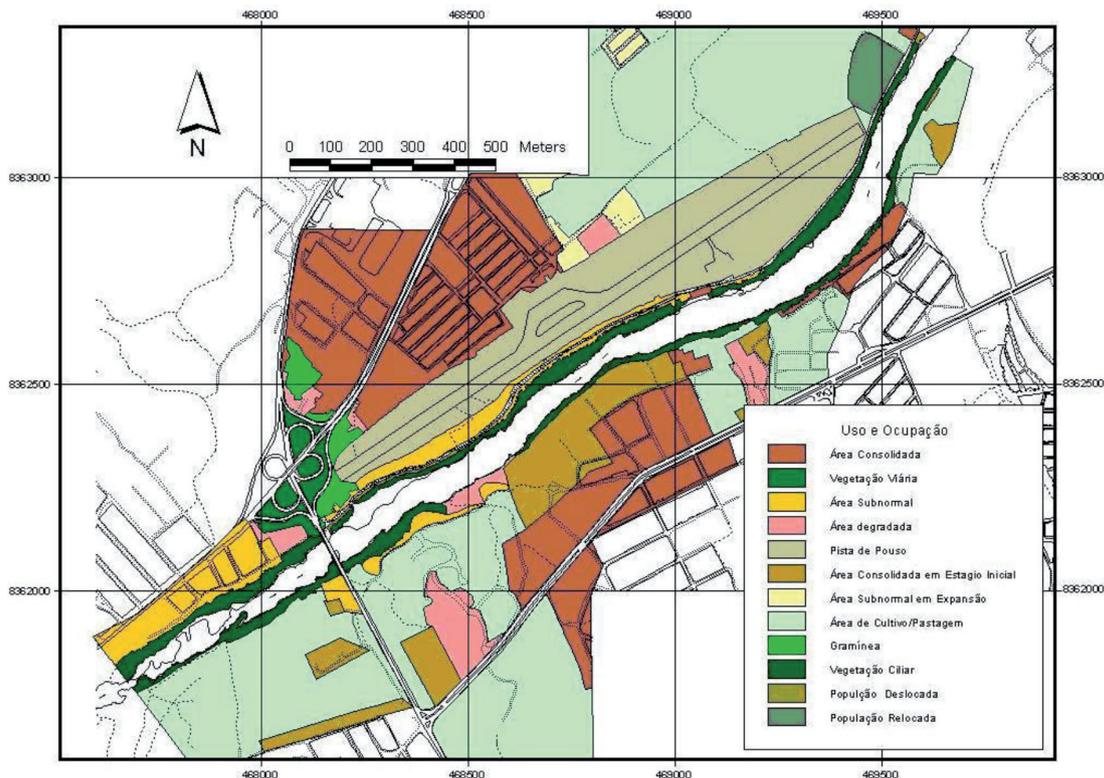


Figura 12 – Mapa de Risco a Inundação do trecho do rio Cachoeira estudado em Itabuna, BA (Fonte: Hora e Gomes, 2009).

Por fim, cada uma das áreas delimitadas terá o seu grau de risco classificado em Muito alto, Alto, Médio ou Baixo em função da adaptação

definida na metodologia sugerida pelo Ministério das Cidades (Tabela 2).

Tabela 2 – Critérios para determinação dos graus de risco (Fonte: Ministério das Cidades, 2007)

Grau de Probabilidade	
Risco Muito Alto	Drenagem ou compartimentos de drenagem sujeitos a processos com alto potencial de causar danos, principalmente sociais, alta frequência de ocorrência (pelo menos 3 eventos significativos em 5 anos) e envolvendo moradias de alta vulnerabilidade.
Risco Alto	Drenagem ou compartimentos de drenagem sujeitos a processos com alto potencial de causar danos, média frequência de ocorrência (registro de 1 ocorrência significativa nos últimos 5 anos) e envolvendo moradias de alta vulnerabilidade.
Risco Médio	Drenagem ou compartimentos de drenagem sujeitos a processos com médio potencial de causar danos, média frequência de ocorrência (registro de 1 ocorrência significativa nos últimos 5 anos).
Risco Baixo	Drenagem ou compartimentos de drenagem sujeitos a processos com baixo potencial de causar danos e baixa frequência de ocorrência (não registro de ocorrências significativas nos últimos 5 anos).

Fonte: (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2005).

4 CONCLUSÕES

O mapeamento de áreas sujeitas a inundações tem relevância no planejamento territorial, particularmente sob a perspectiva de subsidiar a prevenção de desastres naturais frente à expansão urbana e no apoio à gestão territorial. O tipo de carta depende do objetivo (planejamento ou gestão), escala (detalhe, semidetalhe ou regional) e aplicação, assim como da disponibilidade de bases para geração de modelos e informações para validação.

Cartas de suscetibilidade e perigo podem auxiliar no planejamento da expansão urbana, uma vez que possibilitam antever terrenos naturalmente suscetíveis à inundação, por se localizarem em cotas baixas, próximas aos canais de drenagem ou permitem que se associem manchas de inundação a uma probabilidade de ocorrência. As modelagens hidrológicas e hidráulicas utilizadas nos mapas de perigo permitem, após validação, que se realizem análises de cenário para a ocupação na bacia. No caso de bacias de drenagem já ocupadas, a mesma abordagem de perigo deve ser reprocessada com maior detalhe, avaliando-se também a vulnerabilidade. Cartas de risco são instrumentos para gestão urbana que servem para orientar a construção de estruturas que previnam os danos, alertar atuais e futuros proprietários de terras sujeitas às inundações e auxiliar as autoridades e tomadores de decisões a desenvolver novas ideias para o desenvolvimento sustentável nessas áreas.

REFERÊNCIAS

- ANDJELKOVIC, I. **Guidelines on non-structural measures in urban flood management**. IHP, Technical Documents in Hydrology n. 50, UNESCO, Paris. 2001. 87p.
- BITAR, O. Y. (Coord.). **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000** (livro eletrônico): nota técnica explicativa /coordenação Omar Yazbek Bitar. -- São Paulo: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Brasília, DF: CPRM -, Serviço Geológico do Brasil, 2014. - (Publicação IPT; 3016) 5 Mb ; PDF.
- BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES / INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios / Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura, organizadores - Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, 2007.
- CAMPOS, S. J. A. M.; STEFANI, F. L.; PAULON, N. FACCINI, L. G.; BITAR, O. Y. Mapeamento de áreas sujeitas à inundação para planejamento e gestão urbana: cartas de suscetibilidade, perigo e risco. In: 9º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E GEOAMBIENTAL, 2015, Cuiabá, MT. **Anais...** Artigo, 51. CD-ROM.
- CARDOSO, L. **Breves Notas sobre o planejamento Físico-Territorial**. Disponível em: <http://www.etg.ufmg.br/tim1/planejamento-urbano-bonsucesso.pdf>. Acesso em: 18 de Novembro de 2014.
- COOKE, R. U.; DOORNKAMP, J. C. **Geomorphology in environmental management**. Oxford: Clarendon Press, 1990. 410 p.
- DUARTE, Fábio. **Planejamento urbano**. Ipbex, Curitiba, 2007
- FELL, R. *et al.* Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. **Engineering Geology**, v. 102, p. 83-111, 2008.
- HORA, S. B.; GOMES, R. L. Mapeamento e avaliação do risco a inundação do Rio Cachoeira em trecho da área urbana do Município de Itabuna/BA. *Sociedade & Natureza*, Uberlandia, v. 21, nº 2, Ago. 2009.
- HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.
- MONTEIRO, L. R.; KOBIYAMA, M. Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de

- inundação. **REGA - Revista de Gestão de Água da América Latina**, São Paulo, v. 10, n.2, 2013.
- MONTEIRO, C. A. F. **Clima e excepcionalismo: conjecturas sobre o desempenho da atmosfera como fenômeno geográfico**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1991. 241p.
- MÜLLER, V. C. **A quantitative geomorphology study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain Area, Virginia and Tennessee**. New York: Department of Geology, Columbia University, 1953. 51 p.
- PINHEIRO, A. Enchente e inundação. In: SANTOS, R. F. (Org.). **Vulnerabilidade ambiental: desastres naturais ou fenômenos induzidos?** Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. 192p.
- PIRES, E. G.; BORMA, L. S. Utilização do modelo HAND para o mapeamento de bacias hidrográficas em ambiente de Cerrado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE, 2013. p. 5568-5575.
- RENNÓ, C. D. et al. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM; Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 34693481, 2008.
- SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy. **Geological Society of America Bulletin**, n. 67, p. 597-646, 1956.
- SCHUMM, S. A. Sinuosity of alluvial rivers on the great plains. **Geological Society of America Bulletin**, v. 74, n. 9, p. 10891100, 1963.
- SHIDAWARA. M. Flood hazard map distribution. **Urban Water**, v.1, p.125-129, 1999.
- STEPHENSON, D. Integrated flood plain management strategy for the Vaal. **Urban Water**, 4, pp. 425-430, 2002.
- TUCCI, C. E. M. Gestão das inundações urbanas. Global Water Partnership. Edição em arquivo digital. Brasília, 2005.
- VEYRET, Y. Os Riscos: o homem como agressor e vitima do meio ambiente. São Paulo: Contexto, 2007.
- WESTEN, C.J.; VAN ASCH, T.W.J.; SOETERS, R. Landslide hazard and risk zonation: why is it still so difficult?, **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2006, p. 167 - 184.