

CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM INDICADOR DE RISCO DE ALAGAMENTOS EM ÁREAS URBANAS

Maria Teresinha de Medeiros Coelho¹; Ana Lucia Nogueira de Paiva Britto²; & Marcelo Gomes Miguez³

RESUMO - O problema de inundação urbana vem, cada vez mais, fazendo parte da rotina das grandes cidades, que se agrava com a inexistência de um sistema de drenagem eficaz, somado à ineficiência das políticas públicas responsáveis pelo planejamento urbano. Tal problema é ampliado em razão das fragilidades a que se expõe o sistema de drenagem existente. Neste contexto, este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de uma metodologia que permita quantificar o risco de falha do sistema de drenagem em áreas urbanas e suas possíveis fragilidades, através de um índice denominado de Índice de Desempenho de Drenagem – IDD. Trata-se de uma análise multicritério, representada por um índice quantitativo, variável de 0 a 100, tendo por base o conceito de risco, conjugando fatores relacionados tanto às características que potencializam a falha do sistema de drenagem, quanto às características socioeconômicas da população e da região afetada. A construção deste índice mostra que a combinação dos indicadores é fundamental para avaliar de forma mais abrangente as inundações urbanas associadas à falha do sistema de drenagem. Esta metodologia foi aplicada a um estudo de caso na região da Bacia do Rio das Bicas, no município de São Luís – MA.

ABSTRACT: The problem of urban flooding is increasingly becoming part of the routine of big cities dwellers, being aggravated by the lack of an efficient drainage system coupled with the inefficiency of the public policies responsible for the urban planning. This problem is magnified due to the fragilities to which the existing drainage system is exposed. In this context, this paper aims at developing a methodology that allows to quantify the damage or flood consequences resulting from failures of the drainage system in urban areas and its possible fragilities, through a quantitative index, which varies from 0 to 100. This methodology is about a multicriteria analysis in which indicators are used, combining factors related to socioeconomic characteristics of the population and infrastructure of the affected region. The construction of this index shows that the combination of indicators is essential for a broader evaluation of the urban floods associated to the drainage system failures. This methodology was applied to a case study in the region of the “Rio das Bicas” Basin, in São Luis – MA.

PALAVRAS-CHAVES: Drenagem Urbana. Análise Multicritério. Inundações Urbanas.

¹ Universidade Estadual do Maranhão – UEMA. Campus da Cidade Universitária Paulo VI – São Luís – MA. Brasil. Centro de Ciências Tecnológicas – CCT. E-mail: terezinha@mcengenharialda.com.br.

² Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Av. Reitor Pedro Calmon, 550. Prédio da FAU. Cidade Universitária - Rio de Janeiro – RJ. Brasil. Centro de Letras e Artes – CLA. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – FAU. Programa de Pós-Graduação em Urbanismo – PROURB. E-mail: anabrittoster@gmail.com.

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Cidade Universitária - Rio de Janeiro – RJ. Brasil. Centro de Tecnologia – CT. COPPE. E-mail: marcelomiguez@poli.ufrj.br.

1 - INTRODUÇÃO

Atualmente, a inundação urbana representa um grande desafio para os gestores públicos, pois grande parte dos municípios brasileiros apresenta uma situação dramática, expressa através de vários problemas sociais, econômicos e ambientais associados às cheias urbanas. Além da impermeabilização excessiva do solo, outros fatores são responsáveis pelo agravamento de enchentes urbanas, tais como: a ocupação das áreas de várzeas, saturação de canalizações por obstrução de resíduos sólidos e deficiência na cobertura espacial das redes de infraestrutura urbana.

Para uma prévia adoção e implementação de medidas no controle de inundação, é conveniente identificar zonas onde são necessários intervenções, realizar estudos de impacto da expansão urbana sobre o sistema de drenagem e comparar alternativas de solução para o problema. Porém, a literatura mostra que, no Brasil, a avaliação de risco de inundação resulta na simples identificação de zonas críticas, não se preocupando com os aspectos que afetam a criticidade do problema.

Daí a necessidade de se discutir o tema com a perspectiva de subsidiar o planejamento de uso e ocupação do solo em bacias metropolitanas e abordando novos elementos. Assim, propõe-se neste estudo, o desenvolvimento de uma metodologia capaz de quantificar o risco de falha do sistema de drenagem, através de um índice denominado de Índice de Desempenho da Drenagem – IDD. Para tanto, considera-se que o sistema de drenagem urbana é constituído por todo o conjunto de corpos d'água permanente e temporário, natural e artificial, inseridos na área urbana, e que, a falha no seu funcionamento potencializa a ocorrência de inundações, em bacias densamente urbanizadas.

A metodologia desenvolvida para a construção do IDD, parte do entendimento do conceito de risco, em que se considera que o mesmo é constituído por duas componentes: uma que se refere às causas que potencializam o risco de falha do sistema de drenagem, e a outra, relativo às consequências ou danos que as consequentes inundações podem causar. As causas da inundação estão relacionadas com a falha do sistema de drenagem urbana, que por sua vez, estão associadas às características físicas da região e às práticas diretas de uso e ocupação do solo. Quanto às consequências da falha, a metodologia considera as características socioeconômicas da população, como também os serviços de infraestrutura urbana da região afetada.

A análise ou avaliação do risco compreende a atividade voltada para o desenvolvimento de uma estimativa, qualitativa ou quantitativa, do risco, baseada em uma metodologia estruturada para promover a combinação entre a probabilidade de ocorrência e as consequências de um evento perigoso (CETESB, 2003). Dentre as metodologias utilizadas destaca-se a análise multicritério, que é muito utilizada no contexto da gestão dos riscos de inundação.

Análises Multicritério são metodologias desenvolvidas para resolução de problemas complexos, que incluem aspectos qualitativos e/ou quantitativos, envolvendo equipes

multidisciplinares e considerando diversos objetivos, alternativas e fatores que as influenciam (MENDOZA E MACOUN, 1999). Permitem medir as consequências de uma ação em diferentes unidades, e atribuir a elas diferentes pesos, de acordo com o julgamento do tomador de decisão ou parte interessada.

Para verificar a aplicabilidade da metodologia proposta selecionou-se uma bacia localizada na cidade de São Luís (MA), conhecida como a Bacia do Rio das Bicas, que historicamente sofre com problemas de inundação. São Luís, como outras cidades brasileiras, apresenta uma situação indesejável quanto à ocorrência de inundação, que se agrava com a carência de políticas públicas, voltadas para o seu controle e para o planejamento, mais eficaz, do uso e ocupação do solo.

2 - METODOLOGIA PROPOSTA PARA A CONSTRUÇÃO DO IDD

A metodologia proposta visa quantificar o risco de falha do sistema de drenagem, em áreas urbanas, expresso através do IDD. Constitui uma metodologia multicritério em que parte-se de um conjunto de indicadores agregados às informações de distintas naturezas e significâncias, traduzindo-os em um único valor representativo de uma situação real. Para a construção do Índice de Desempenho da Drenagem – IDD propõe-se as etapas a seguir.

Formulação do índice:

O cálculo do índice é feito através da formulação dada por uma equação matemática que traduz as relações entre os indicadores que o compõem, resultando em uma estimativa qualitativa sobre o aspecto que se deseja medir (ZONENSEIN, 2007). Para essa concepção, optou-se por uma formulação ponderada mista, composta tanto por um somatório quanto por um produtório.

O Produtório Ponderado representa a interação entre as duas componentes do risco, denominadas neste estudo por subíndices, que são: a probabilidade de ocorrer falha no sistema de drenagem, representados pela sigla “FD”, e as consequências ou danos no caso de ocorrer uma inundação, representados pela sigla “C”. Cada um desses subíndices está associado a um peso e, portanto, causa efeitos diferenciados sobre o risco final. O peso de cada um será representado por “ q_{FD} e q_C ”, respectivamente.

Na Eq. (1), está representada a relação entre os dois subíndices.

$$IDD = FD^{q_{FD}} \times C^{q_C} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

- IDD: Índice de Desempenho da Drenagem variável entre 0 (representa o menor risco) e 100 (representa o maior risco);

- FD: subíndice, relativo às propriedades associadas às causas da falha da drenagem, variável entre 0 e 100;
- C: subíndice relativo às consequências ou danos da inundação, variável entre 0 e 100;
- q_{FD} e q_C : pesos correspondentes às propriedades de causa de falha da drenagem e às consequências ou danos, respectivamente, atribuídos em função da importância do subíndice para a avaliação do risco final.

Para que a escala de variabilidade seja respeitada, os pesos estão sujeitos às seguintes condições ou restrições, apresentadas na Eq. (2) e na Eq. (3).

$$0 < q_{FD}, q_C \leq 1 \quad \text{Eq. (2)}$$

$$q_{FD} + q_C = 1 \quad \text{Eq. (3)}$$

O Somatório Ponderado representa a relação entre os fatores que contribuem para cada uma das duas componentes (subíndices), consideradas no cálculo do IDD. Cada um dos subíndices (FD e C) é calculado a partir de um somatório ponderado de indicadores, previamente normalizados, entre 0 e 100. Por isso, um subíndice será nulo somente se todos os indicadores que o compõe forem nulos. Caso contrário, basta que algum dos indicadores represente um valor para que o subíndice não se anule.

A Eq. (4) e a Eq. (5) representam a relação entre os indicadores de cada sub-índice.

$$FD = \sum_{i=1}^n I_i^{FD} \cdot p_i^{FD} \quad \text{Eq. (4)}$$

$$C = \sum_{j=1}^m I_j^C \cdot p_j^C \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

- I_i^{FD} : i-ésimo indicador que compõe o subíndice FD, previamente normalizado, variável entre 0 e 100;
- I_j^C : j-ésimo indicador que compõe o subíndice C, previamente normalizado, variável entre 0 e 100;
- n: número total de indicadores que compõe o subíndice FD;
- m: número total de indicadores que compõe o subíndice C;
- p_i^{FD} : peso associado ao i-ésimo indicador do subíndice FD, atribuído em função de sua importância relativa. Devem ser observadas as restrições da Eq. (6) e da Eq. (7);
- p_j^C : peso associado ao j-ésimo indicador do subíndice C, atribuído em função de sua importância relativa. Devem ser observadas as restrições da Eq. (6) e da Eq. (8).

$$0 \leq p_i^{FD}, p_j^C \leq 1 \quad \text{Eq. (6)}$$

$$\sum_{i=1}^n p_i^{FD} = 1 \quad \text{Eq. (7)}$$

$$\sum_{j=1}^m p_j^C = 1 \quad \text{Eq. (8)}$$

Para a formulação final do IDD, basta substituir a Eq. (4) e a Eq. (5) na Eq. (1), obtendo a Eq. (9), descrita a seguir:

$$\text{IDD} = \underbrace{\left[\sum_{i=1}^n I_i^{FD} \cdot p_i^{FD} \right]^{q_{FD}}}_{\text{FD}} \times \underbrace{\left[\sum_{j=1}^m I_j^C \cdot p_j^C \right]^{q_C}}_{\text{C}} \quad \text{Eq. (9)}$$

Escolha dos indicadores e normalização:

A escolha dos indicadores depende, basicamente, das características a serem analisadas e do propósito inicial de estudo. Assim sendo, foram selecionados alguns indicadores que apontam e fornecem informações sobre a criticidade de uma inundação, buscando uma apropriação racional com a realidade empírica, numa extensão significativa.

Os indicadores foram obtidos como resultado de um levantamento de dados em órgãos governamentais e instituições de pesquisas estatísticas e censitárias, cartografias e mapas, visitas e questionários aplicados na região de estudo. Assim, foram selecionados quatro indicadores que irão compor o subíndice Causas da Falha de Drenagem (FD): a declividade da bacia; a impermeabilização do solo; a disposição inadequada de resíduos sólidos; e a proximidade dos cursos d'água. Para compor o subíndice Consequências ou Danos de Inundação (C), decorrentes da falha do sistema de drenagem, foram considerados cinco indicadores: a renda; a densidade domiciliar; o saneamento inadequado; o tráfego; e o tipo de revestimento das vias da área em estudo. Todos estão especificados a seguir.

A seguir, são apresentadas a descrição e as considerações para a normalização de cada indicador.

Declividade (I_{DEC}^{FD})

Esse indicador utiliza a declividade natural da bacia hidrográfica, como indicativo da probabilidade de ocorrência de uma inundação. Em áreas planas, existe maior possibilidade de falha do sistema de drenagem (galerias, canais naturais, talvegues etc.), pois apresenta baixa eficácia no escoamento das águas. Desse modo, a relação entre a declividade/topografia da região e a

probabilidade no que se refere a ocorrências de cheias é, portanto, bem clara.

A normalização desse indicador parte de um julgamento empírico acerca dos danos causados pelas inundações a diferentes declividades. Assim, considera-se que essa relação não é linear, ou melhor, a proporção entre o incremento da declividade e o dos danos não é constante. Por isso, optou-se pelo método de normalização por faixas, aplicando a interpolação linear entre os limites adotados. Com base nessas considerações, procedeu-se a normalização desse indicador utilizando como referência, a qualificação de condições de declividade de relevo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2006). A partir dessa classificação, elaborou-se a carta de declividade e, em seguida, adotou-se uma normalização para as faixas de declividades correspondentes. Na Tabela 1, apresentam-se as classes de relevo, a faixa de declividade correspondente e a normalização adotada neste estudo. A Figura 1 mostra o gráfico que relaciona a declividade do terreno com o valor normalizado do indicador.

Tabela 1: Faixas de normalização da declividade.

Classes	Características	Declividade (%)	I_{DEC}^{FD}
Plano	Superfície onde os desníveis são muito pequenos	$\leq 0,5$	100
Suave Ondulado	Superfície onde os declives são suaves	3,0	70
Ondulado	Superfície constituída de colinas com declives moderados	6,0	20
Forte Ondulado	Superfície onde predominam declives fortes	$\geq 8,0$	0

Fonte: Adaptada da EMBRAPA (2006).

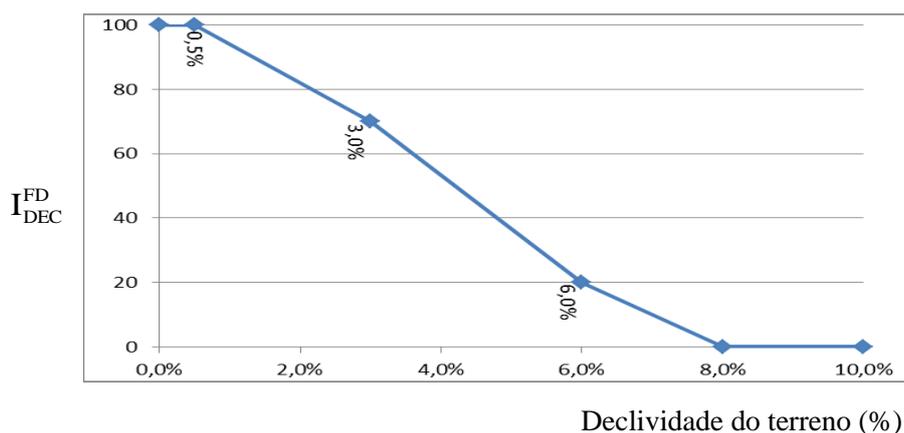


Figura 1 – Curva de normalização por faixas para I_{DEC}^{FD} , com interpolação linear entre limites ($y = I_{DEC}^{FD}$ e $x =$ declividade (%)).

Impermeabilização ou Uso do Solo (I_{IMP}^{FD})

Outro aspecto que também é considerado como responsável potencial na ocorrência de inundações e está associado à falha do sistema de drenagem é a impermeabilização do solo. Neste

estudo, a normalização desse indicador parte de um julgamento acerca dos efeitos potencialmente danosos referentes a diferentes níveis de impermeabilização do solo. Optou-se pelo método de normalização por faixas, de acordo com limites arbitrados. Entre esses limites é aplicada a interpolação linear em que são mensurados valores intermediários.

A normalização desse indicador utilizou-se, como referência, a classificação do uso e cobertura do solo, utilizando imagens da cidade de São Luís, com resolução espacial de 2m, obtidas no Google Earth (2007), a partir da interpretação visual dessas imagens. As classes uso e cobertura foram delimitadas dentro de cinco grandes dimensões, na qual se associou o nível de permeabilidade, para cada uma. Em seguida, adotou-se uma normalização para as faixas de níveis de permeabilidade correspondentes, conforme se apresenta na Tabela 2. A Figura 2 mostra o gráfico que relaciona a declividade do terreno com o valor normalizado do indicador.

Tabela .2: Faixas de normalização da impermeabilização do solo.

Classes	Nível de permeabilidade	Impermeabilização do solo (%)	I_{IMP}^{FD}
Arbóreo	Alta	≤ 5	0
Arbustivo	Média	35	35
Herbáceo	Baixa	65	65
Solo Exposto	Muito Baixa	85	85
Solo Urbano	Impermeável	≥ 95	100

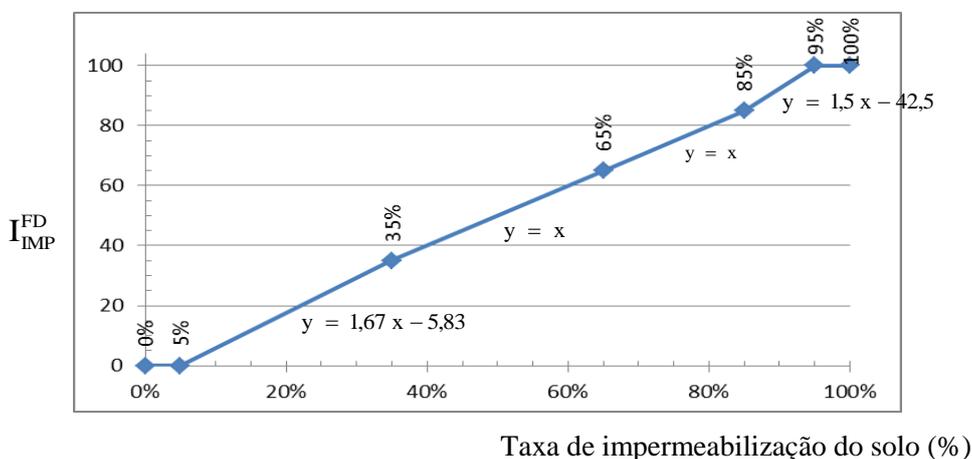


Figura 2 – Curva de normalização do indicador Impermeabilização do Solo (I_{IMP}^{FD}).

Disposição Inadequada de Resíduos Sólidos (I_{RES}^{FD})

O aumento de resíduos sólidos urbanos está, a cada dia, mais relacionado ao problema de inundações e à questão da drenagem urbana. A grande quantidade de lixo urbano que é carregado para o sistema de drenagem depende, entre outros fatores: da frequência e da cobertura da coleta de lixo; da frequência da limpeza e da varrição das ruas; da natureza da ocupação e das atividades

desenvolvidas na área; e da forma de disposição do lixo pela população. Conjuntamente a esses fatores, também depende da frequência e da intensidade das precipitações pluviométricas ocorridas.

Outro aspecto questionado é a prática inadequada utilizada para eliminar os resíduos sólidos, dentre elas estão a descarga em mananciais e a disposição em aterros ou em áreas livres. Esses resíduos atingem o sistema de drenagem urbana, comprometendo sua condição de escoamento e, conseqüentemente, contribuindo para agravar a ocorrência de inundação no local.

Assim sendo, a falta do serviço de coleta e da limpeza e varrição das ruas, bem como a quantidade de locais com disposição inadequada de resíduos sólidos, podem potencializar, em muito, a probabilidade de ocorrência de inundações urbanas, em função do estado de fragilidade a que se expõe o sistema de drenagem.

A relação entre esse parâmetro e os danos causados pela inundação fica bem clara, porém, não há estudos indicativos da relação entre a quantidade de resíduos sólidos, que atinge o sistema de drenagem urbana, e os danos causados pela inundação. Na ausência de mais informações, considera-se que quanto maior for a quantidade de resíduos, maior será a probabilidade de obstruir o sistema de drenagem e de ocorrer uma inundação; e, como consequência, maior será o potencial de danos e prejuízos resultantes.

Entre os fatores que contribuem para a obstrução do sistema de drenagem, serão considerados, neste estudo, como sendo os de maior relevância: a cobertura do serviço de coleta e a quantidade de locais com disposição inadequada, dos resíduos sólidos. Ressalta-se que na prática, a quantidade de locais com disposição inadequada de resíduos sólidos, muitas vezes, é consequência da pouca frequência do serviço de coleta de lixo. Assim, considera-se que a falta de coleta de lixo provoca mais obstruções no sistema de drenagem urbana que a disposição inadequada de resíduos sólidos.

Os dados referentes ao serviço de coleta de resíduo sólido serão extraídos de informações censitárias, enquanto que a quantidade de locais com disposição inadequada de resíduos sólidos (depósitos e acúmulos) foi obtida em visitas realizadas na área de estudo.

Por se tratar de indicadores de naturezas distintas é necessário normalizá-los separadamente, de acordo com escalas específicas, representando seus efeitos, diferenciados, sobre o sistema de drenagem. Para a conjugação desses efeitos em um único indicador, propõe-se a média ponderada de seus valores normalizados, cujos pesos considerados estão expressos na Eq. (10), a seguir, utilizada no cálculo do indicador I_{RES}^{FD} . Cabe ressaltar que esses pesos refletem o julgamento subjetivo sobre a avaliação dos efeitos provocados por cada um, estando sujeito a variações.

$$I_{RES}^{FD} = 2/3 (I_{CR}) + 1/3 (I_{LO}) \quad \text{Eq. (10)}$$

Onde:

I_{RES}^{FD} : valor normalizado do indicador Disposição Inadequada de Resíduos Sólidos, variável de 0 a 100;

I_{CR} : valor normalizado do serviço de coleta de resíduos sólidos, variável de 0 a 100; e

I_{LO} : valor normalizado da quantidade de locais com disposição inadequada de resíduos sólidos, variável de 0 a 100.

Para o serviço de coleta de resíduos sólidos, considera-se que 0% e 100% de não coleta representam, respectivamente, o menor e o maior potencial de danos, durante uma inundação. Essas porcentagens correspondem aos seus valores normalizados, de mesma dimensão. Assim, tem-se uma normalização que pode ser representada por uma variação linear.

Quanto a normalização da quantidade de locais com disposição inadequada de resíduos sólidos, pode-se aplicar uma normalização linear, uma vez determinados os valores mais e menos favoráveis que ele pode assumir. Esses valores são obtidos pelo número de pontos por unidade de área (ha), considerando a região delimitada pelos setores censitários inseridos na Bacia do Rio das Bicas, extraídas do IBGE (2000).

Assim, a quantidade de locais de disposição inadequada, mais favorável é 0 (zero) locais/ha. Seu valor normalizado, também, corresponde ao valor 0 (zero) e representa o menor potencial de danos durante uma inundação. Para o valor menos favorável considera-se que ele corresponde à maior quantidade de locais/ha, observada na área de estudo. Assim, utilizou-se o valor 1,00 (um) local/ha, como o mais desfavorável.

Na Figura 3 apresentam-se os gráficos com os valores normalizados do serviço de coleta e da quantidade de pontos com disposição inadequada, dos resíduos sólidos.

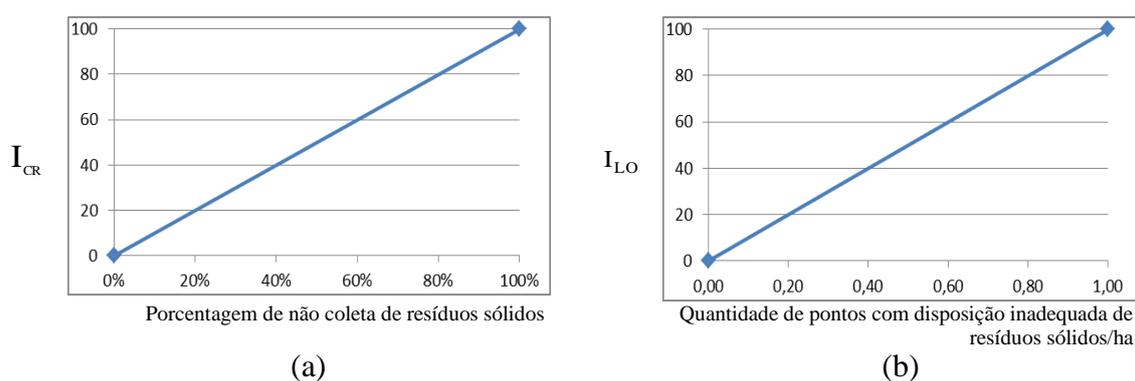


Figura 3 – Curvas de normalização para o serviço de coleta de resíduos (a) e para a quantidade de pontos com disposição inadequada de resíduos sólidos/ha (b).

Proximidade dos Cursos D'Água (I_{CA}^{FD})

O estudo desse indicador parte de uma análise da localização dos imóveis na faixa marginal ao longo do rio, ou de qualquer curso d'água, tendo, como referência, os limites das larguras

mínimas, estabelecidas na legislação brasileira, especificamente, em relação à regulação de áreas de proteção permanente e o ordenamento do solo urbano.

Desse modo, pode-se relacionar a proximidade, dos imóveis, aos cursos d'água, com o potencial de falha do sistema de drenagem. Em outras palavras, quanto mais próximo estiver o imóvel do curso d'água, maior será a probabilidade de alterar as condições naturais de funcionamento do sistema de drenagem eliminando áreas naturais de escoamento ou armazenagem e, conseqüentemente, maiores serão os prejuízos ou danos resultantes. Nesse contexto, as conseqüências para o sistema de drenagem estão associadas ao uso e ocupação do solo nessas áreas. Por isso, é conveniente associar esse indicador com a situação de proximidade do imóvel aos cursos d'água. Sendo assim, para o método proposto, é feita uma classificação em uma escala de três níveis, na qual são consideradas diferentes situações, baseadas no potencial dos danos em função da proximidade dos imóveis aos cursos d'água, conforme se apresenta, a seguir, na Tabela 4.

Tabela 3: Classificação da situação do imóvel, em relação à sua proximidade dos cursos d'água.

Situação do Imóvel	Localização do Imóvel
Crítica	- em áreas alagáveis - em fundo de vales - em áreas de mangue - em faixa marginal ao longo do rio, ou de qualquer curso d'água: <ul style="list-style-type: none"> • até 15m para pequenos cursos d'água; • até 30m para os cursos d'água de menos de 10m de largura; • até 50m para os cursos d'água que tenham de 10 a 50m de largura; • até 100m para os cursos d'água que tenham de 50 a 200m de largura.
Pouco crítica	- áreas localizadas na faixa de 15 a 30m para pequenos cursos d'água (Resoluções CONAMA e Lei 6.766/79).
Não crítica ou regular (*)	- em demais áreas, ou seja, excluindo as localizadas em situação crítica e pouco crítica.

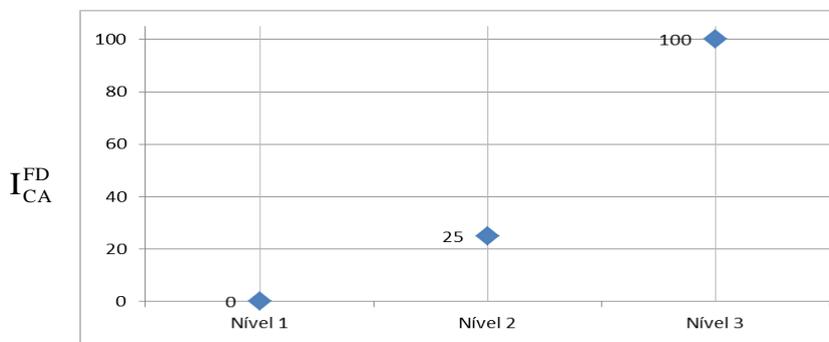
(*) considerado situação regular os imóveis localizados em áreas não classificadas como APPs.

Diante de tais considerações, entende-se que esse indicador pode ser normalizado, considerando a criticidade do impacto, no caso da ocorrência de uma chuva, sobre cada nível de situação abordada. Assim, foram definidos 3 níveis de escala de normalização, mediante uma análise sobre o potencial de danos causados pelas inundações, nas diferentes situações. Essa análise foi feita através de um julgamento subjetivo e, portanto, passível de variações. Como não há valores intermediários entre os níveis, esta escala é de normalização discreta, em que se considera as áreas pertencentes a cada nível de situação, como o domínio de aplicação do índice.

Neste estudo, o indicador é denominado de “proximidade dos cursos d'água” e é representado pela sigla “CA”. Na Tabela 4, apresenta-se a normalização adotada, de acordo com a classificação proposta e o julgamento sobre possíveis danos. Para maior entendimento, a situação do imóvel, constante na Tabela 4, é associada a um nível, conforme a sua localização em relação ao curso d'água. Na Figura 4, é apresentada a normalização desse indicador.

Tabela 4: Valores de normalização da proximidade aos cursos d'água.

Situação do Imóvel	Nível	I_{CA}^{FD}
Crítica	3	100
Pouco crítica	2	25
Não crítica ou regular	1	0



Nível de Proximidade dos Cursos D'Água.

Figura 4 – Normalização discreta do indicador da Proximidade dos Cursos d'Água (I_{CA}^{FD}).

Renda (I_R^C)

Neste estudo considera-se que os danos causados por uma inundação podem ser avaliados pela dimensão social, tendo como referência a renda per capita mensal da população, visto que permite a comparação entre zonas com predomínio de populações de diferentes categorias sociais. Considerou-se ainda que, quanto menor for a renda do cidadão afetado, maior será o dano causado em seu domicílio ou bens, tendo em vista suas condições de fragilidade e exposição ao risco. Nesse caso, o que se pretende indicar com a renda é o valor representativo das categorias sociais, não sendo estudado o que esse valor representa para cada vítima, considerando os seus rendimentos mensais.

A partir de pesquisa sobre a renda média, referentes a São Luís e realizada nas regiões críticas de inundação, pertencentes à área de estudo, adotou-se os valores limites de cada classe social e procedeu-se a interpolação dos valores intermediários, através da função linear entre os pontos obtidos. Na Tabela 5, apresentam-se os valores limites para cada classe de renda e seu índice normalizado.

Tabela 5: Classes de Renda com valores normalizados.

Classe E	Classe D	Classe C		Classe B		Classe A	
		C2	C1	B2	B1	A2	A1
R\$ 276,70 a R\$ 484,97	R\$ 484,97 a R\$ 726,26	R\$ 726,26 a R\$ 1.194,53	R\$ 1.194,53 a R\$ 2.012,67	R\$ 2.012,67 a R\$ 3.479,36	R\$ 3.479,36 a R\$ 6.563,73	Acima de R\$ 9.733,47	
\leq R\$ 432,90		= R\$ 960,40		= R\$ 2.746,02	\geq R\$ 5.021,55		
$I_R^C = 100$		$I_R^C = 90$		$I_R^C = 50$	$I_R^C = 20$		

I_R^C = valor normalizado do indicador de renda dos moradores atingidos por inundação.

Densidade Domiciliar (I_{DD}^C)

Esse indicador mede o número de domicílios por unidade de área e, neste estudo, é utilizado para estimar a quantidade de pessoas e bens que são atingidos pela inundação.

Entretanto, não são conhecidos estudos que indicam a relação entre o número de pessoas/propriedades afetados e os danos causados por inundações. Diante da ausência de mais informações, considera-se, neste estudo, que quanto maior for a densidade de domicílios, maior será o potencial de danos e prejuízos, e também que essa relação varia linearmente.

Assim, para esse indicador, pode-se aplicar a normalização linear por distância, uma vez determinados os valores mais e menos favoráveis que ele pode assumir. Dessa forma, foi considerado que a densidade de domicílios mais favorável é 0 (zero) domicílios/ Km^2 , isto é, que representa menos potencial de danos durante uma inundação, com o $I_{DD}^C = 0$.

Para determinar a máxima densidade de domicílios, foram consideradas as densidades domiciliares extraídas do IBGE (2000), para área de estudo. Após uma análise dos dados optou-se por associar a $I_{DD}^C = 100$ à densidade igual a 5.000 domicílios/ Km^2 correspondente a 90% da distribuição dessa variável, na região. A partir dessas considerações, é possível obter o gráfico, contendo as funções de normalização do indicador de densidade domiciliar, apresentado, a seguir.

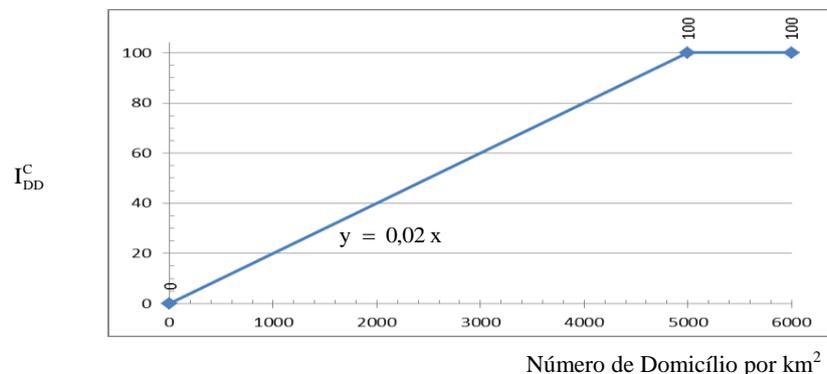


Figura 5 – Funções de normalização para densidade domiciliar (I_{DD}^C).

Saneamento Inadequado (I_{SI}^C)

A falta de sistemas apropriados no serviço de saneamento básico, em particular o esgotamento sanitário e a coleta de resíduos sólidos, é determinante na severidade do problema de inundações, visto que agravam as consequências das enchentes, aumentando o risco de transmissão de doenças de veiculação hídrica. Entretanto, não se têm informações precisas, associando a quantidade de doentes à ocorrência de inundações e falta de saneamento básico. Porém, entende-se que o indicador I_{SI}^C pode ser associado ao percentual de domicílios carentes de saneamento adequado, de forma que, quanto mais domicílios tiverem condições inadequadas de saneamento, maior será o valor desse indicador.

Entretanto, como não se dispõe de informações mais específicas, quanto à relação entre o saneamento inadequado e o potencial de danos provocados pelas inundações, sugere-se o uso de normalização linear. Desse modo, considera-se que 0% de domicílios com saneamento inadequado, em um setor censitário, representa o menor potencial de danos, durante uma inundação, com $I_{SI}^C = 0$. Da mesma forma, considera-se que 100% de saneamento inadequado representa o valor mais desfavorável com $I_{SI}^C = 100$. A seguir, é apresentada, na Figura 6, a curva de normalização desse indicador, de acordo com as considerações formuladas.

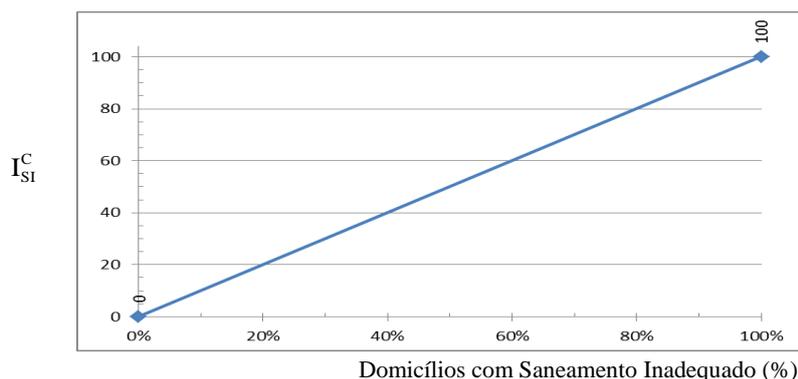


Figura 6 – Curva de normalização para o indicador de Saneamento Inadequado (I_{SI}^C).

Tráfego (I_T^C)

O tráfego de veículos é um dos principais elementos, afetados pelas inundações. É comum ver notícias, na mídia, a respeito de situações caóticas sobre quilômetros de congestionamentos, decorrentes de alagamentos de vias após uma chuva, resultando em danos inquestionáveis e, muitas vezes, de difícil avaliação. Neste estudo, o dano ou as consequências de uma cheia no tráfego de veículos, são avaliados em função tanto do número de veículos quanto da importância das vias afetadas. Nesse caso, é conveniente associar esse indicador a algum tipo de hierarquização de vias de trânsito, levando em conta o fluxo de veículos que, em geral, é reflexo de sua importância para a interligação entre as diversas regiões do município. Desse modo, utilizou-se, como referência neste estudo, a classificação das vias contidas na legislação urbanística de São Luís (1992). Para cada nível de hierarquia da via, a Tabela 6 apresenta o valor associado do indicador normalizado.

Tabela 6: Valores normalizados do Indicador Tráfego, de acordo com a classificação das vias de São Luís – MA.

Classificação das Vias	Nível	Indicador Normalizado
Vias Primárias	1	100
Vias Secundárias	2	70
Vias Coletoras	3	30
Vias Locais	4	10

Fonte: Plano Diretor de São Luís de 1992.

Revestimento das Vias (I_{RV}^C)

O último indicador, a ser considerado no cálculo do índice, refere-se à análise dos prejuízos para a infraestrutura pública, por uma associação com o tipo de revestimento das vias afetadas na ocorrência de uma inundação. Esse indicador utiliza como parâmetro, o revestimento da via para estimar a importância das outras estruturas públicas, quando afetadas por uma inundação. Dessa forma, considera-se que quanto melhor for o tipo do revestimento, mais onerosa se torna a recuperação das estruturas localizadas no entorno. Assim, foram feitas vistorias na região, percorrendo todas as vias, com o objetivo de identificar o tipo de revestimento existente. Nos locais de difícil acesso, os dados foram complementados com informações obtidas na Secretaria Municipal de Obras e Serviços Públicos (SEMOSP) de São Luís. Dessa forma, foram identificados e considerados, neste estudo, quatro tipos de revestimento, conforme apresentados na Tabela 6.

Esses tipos de revestimentos foram associados a valores normalizados, considerando a importância, ou relação de cada um, com a presença de uma infraestrutura mais “cara” no seu entorno. O revestimento asfáltico recebe o maior indicador normalizado por ser o de melhor qualidade, entre os considerados. Para os demais foram atribuídos valores proporcionais considerando as suas características. Na Tabela 7, a seguir, apresenta o valor normalizado para cada tipo de revestimento.

Tabela 7: Valores normalizados para os diferentes tipos de revestimento das vias.

Tipo de Revestimento da Via	Valor Normalizado
Asfáltico	100
Paralelepípedo	80
Tratamento Superficial Simples	30
Sem Revestimento (regularização)	10

Outras considerações:

Para cada indicador, é atribuído um peso que é representado na composição do índice. Para isso, utilizou-se o Processo de Análise Hierárquica (PAH) criado por Saaty (1977), onde os indicadores são comparados par a par e estimados os pesos relativos.

Propõe-se a aplicação do índice em áreas relativamente pequenas, como sub-bacias ou sub-regiões de municípios. No entanto, ele pode ser aplicado a domínio maiores, desde que se tenha dados com precisão adequada e se façam ajustes nas escalas.

Para a representação dos resultados obtidos utilizou-se como ferramenta, o Sistema de Informação Geográfica – SIG, pois este permite a realização de análises complexas, integrando dados de diversas fontes, criando bancos de dados georreferenciados, e resultados apresentados em mapas.

3 - ÁREA DE ESTUDO

A região selecionada para o estudo, que delimita o domínio de aplicação do ICI, é a Bacia do Rio das Bicas, integrante da Bacia do Rio Bacanga, localizada na área metropolitana de São Luís (MA). Esta região sofre periodicamente com as enchentes que ocorrem nas áreas mais baixas da bacia, que apresenta alta densidade populacional e de características de ocupação desordenada. Envolve bairros residenciais de classe baixa e média, cuja forma de ocupação e uso do solo tem sido motivo de preocupação para os gestores locais, apresentando várias situações com imóveis localizados em áreas de várzeas ou próximos a cursos d'água. Está localizada a nordeste da Bacia do Bacanga, na margem direita de seu rio principal (Rio Bacanga) a, aproximadamente, 4 km do centro histórico. A seguir, apresenta-se, na Figura 7, a localização da Bacia do Rio das Bicas.

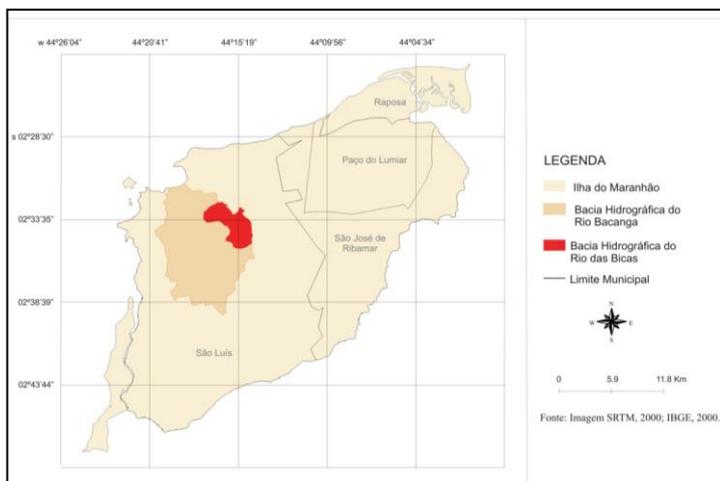


Figura 7: Localização da Bacia do Rio das Bicas.
Fonte: Laboratório de Geoprocessamento da UEMA/2010.

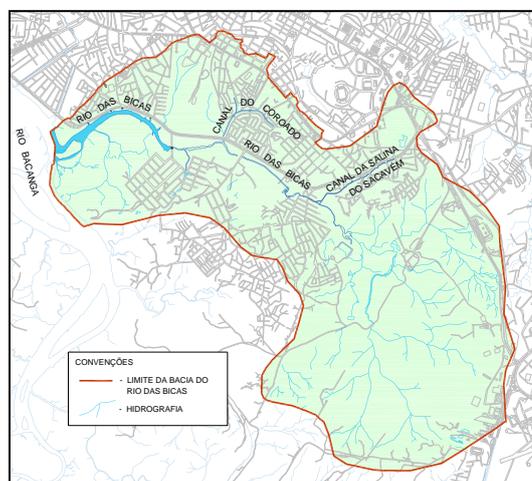


Figura 8: Rede hidrográfica da Bacia do Rio das Bicas.
Fonte: Fonte: Planta Aeroconsult, 2001.

A Bacia do Rio das Bicas, cuja rede hidrográfica apresenta-se na Figura 8, tem uma área aproximada de 14 km², sendo que 33% estão localizados dentro do Parque Estadual do Bacanga. Do restante, mais da metade corresponde a áreas que margeiam cursos d'água ou planas, incluindo mangues com algumas palafitas. A outra parte se distribui entre áreas de encostas instáveis ou de declividades elevadas e áreas com ocupação acentuada, que apresentam alto grau de impermeabilização.



Figura 9 – Imagens de regiões pertencentes à Bacia do Rio das Bicas.

4 - RESULTADOS OBTIDOS

Cálculo dos Indicadores:

Conforme metodologia apresentada é possível fazer uma estimativa quantitativa dos danos causados por uma inundação urbana decorrentes da falha do sistema de drenagem urbana. Esse procedimento será feito através do cálculo de cada indicador que irão compor o índice e serão utilizados, como base, os setores censitários do IBGE (2000), cujo domínio fica definido pela região da Bacia do Rio das Bicas, representados por polígonos no SIG. Os resultados são apresentados a seguir, através de mapas temáticos, contendo a área da Bacia do Rio das Bicas.

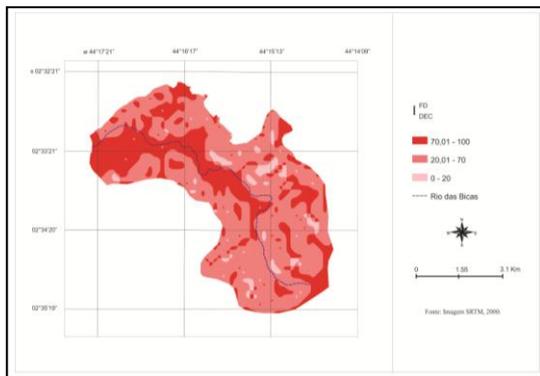


Figura 10: Mapa com o resultado do Indicador I_{DEC}^{FD} .

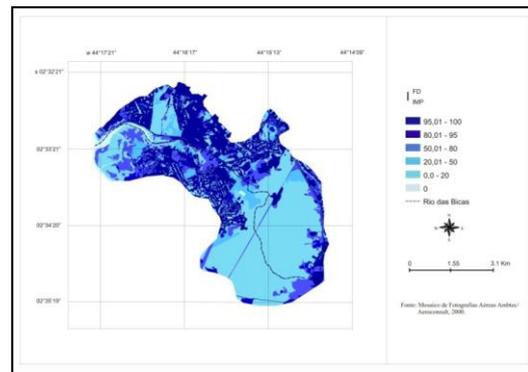


Figura 11: Mapa com o resultado do Indicador I_{IMP}^{FD} .

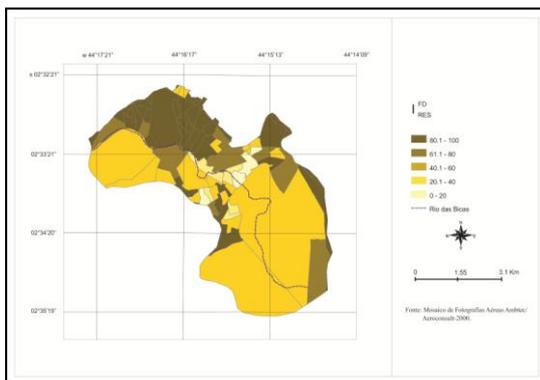


Figura 12: Mapa com o resultado do Indicador I_{RES}^{FD} .

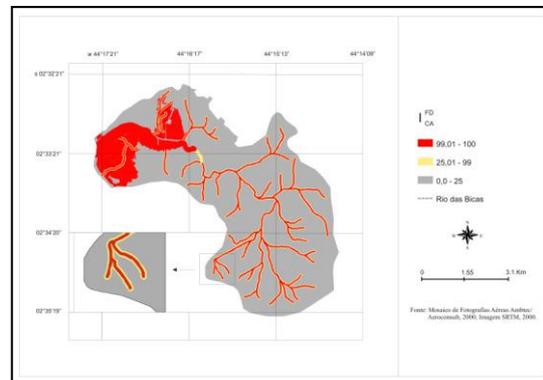


Figura 13: Mapa com o resultado do Indicador I_{CA}^{FD} .

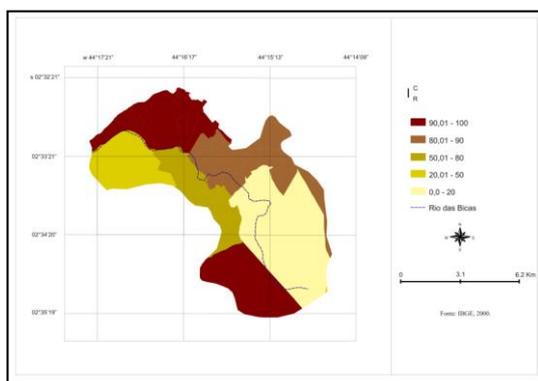


Figura 14: Mapa com o resultado do Indicador I_{R}^C .

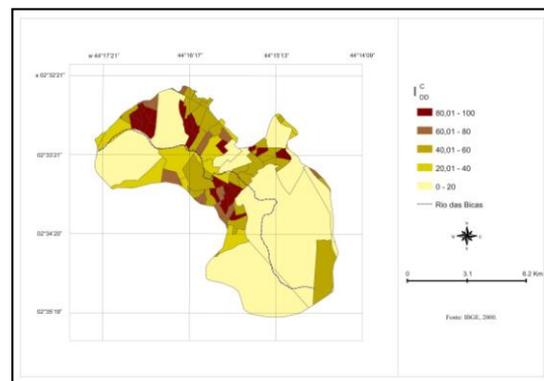


Figura 15: Mapa com o resultado do Indicador I_{DD}^C .

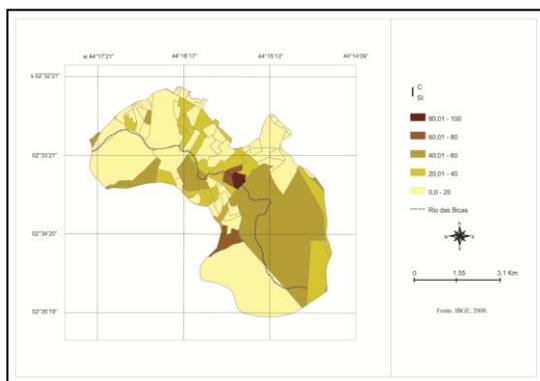


Figura 16: Mapa com o resultado do Indicador I_{Si}^C .

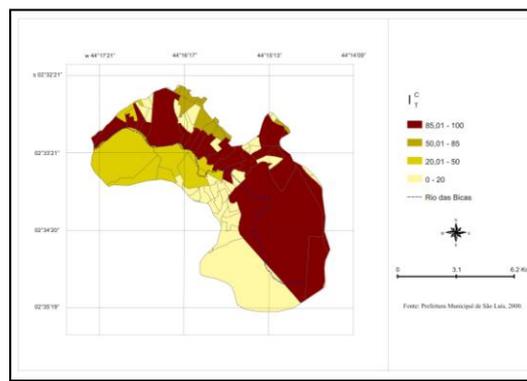


Figura 17: Mapa com o resultado do Indicador I_T^C .

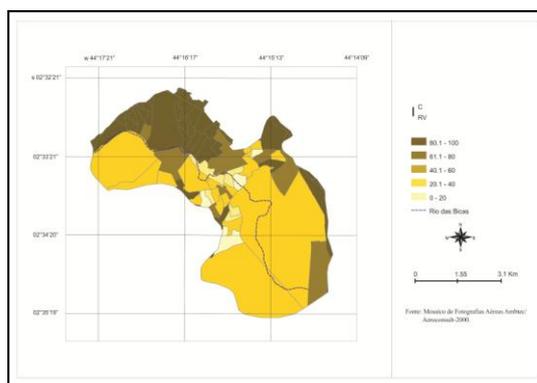


Figura 18: Mapa com o resultado do Indicador I_{RV}^C .

Cálculo do IDD

A partir dos cálculos de cada indicador, é possível calcular o valor do IDD através do produtório ponderado entre os subíndices, conforme exposto na Eq. (1). Como ambos os subíndices estão associados às mesmas subdivisões do domínio, ou seja, aos setores censitários, é possível obter o valor do IDD, uma vez determinados os pesos relativos a cada um deles. Nesse caso, em que o índice é formado por um produtório ponderado, os pesos, q_{FD} e q_C são expoentes dos subíndices, diferente do cálculo individual dos subíndices, que é resultante dos somatórios ponderados, nos quais os pesos são coeficientes multiplicadores dos indicadores, conforme apresentado na Eq. 4 e 5.

Para o cálculo do índice proposto foi necessário determinar pesos para cada um desses indicadores, utilizando o método de análise hierárquica (PAH), conforme sugerido. Assim, foram elaborados dez cenários para simular diferentes julgamentos, exemplificando sua aplicação, embora essa metodologia permita novos julgamentos. Para a determinação dos pesos dos indicadores de cada cenário, fixou-se um como sendo o de maior importância, considerando que suas características individuais contribuem com maiores danos e prejuízos em uma área afetada por uma inundação urbana. Para os demais indicadores, considerou-se que possuem a mesma importância, no respectivo cenário. Um último cenário foi proposto com pesos iguais para todos os indicadores.

Tabela 8: Cenários para o cálculo do IDD.

Cenários	Combinações de cenários dos subíndices		Pesos dos Indicadores								
	FD (peso $q_{FD} = 0,50$)	C (peso $q_C = 0,50$)	P_{DEC}^{FD}	P_{IMP}^{FD}	P_{RES}^{FD}	P_{CA}^{FD}	P_R^C	P_{DD}^C	P_{SI}^C	P_T^C	P_{RV}^C
IDD-C1	FD-C1	C-C6	0,52	0,16	0,16	0,16	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
IDD-C2	FD-C2	C-C6	0,16	0,52	0,16	0,16	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
IDD-C3	FD-C3	C-C6	0,16	0,16	0,52	0,16	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
IDD-C4	FD-C4	C-C6	0,16	0,16	0,16	0,52	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
IDD-C5	FD-C5	C-C1	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50	0,125	0,125	0,125	0,125
IDD-C6	FD-C5	C-C2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,125	0,50	0,125	0,125	0,125
IDD-C7	FD-C5	C-C3	0,25	0,25	0,25	0,25	0,125	0,125	0,50	0,125	0,125
IDD-C8	FD-C5	C-C4	0,25	0,25	0,25	0,25	0,125	0,125	0,125	0,50	0,125
IDD-C9	FD-C5	C-C5	0,25	0,25	0,25	0,25	0,125	0,125	0,125	0,125	0,50
IDD-C10	FD-C5	C-C6	0,25	0,25	0,25	0,25	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Os resultados desses cenários estão apresentados, a seguir, através de mapas temáticos obtidos segundo os julgamentos considerados. Neste estudo, optou-se em dividir os resultados em cinco classes de risco de inundação: muito alto, alto, médio, muito baixo e baixo.

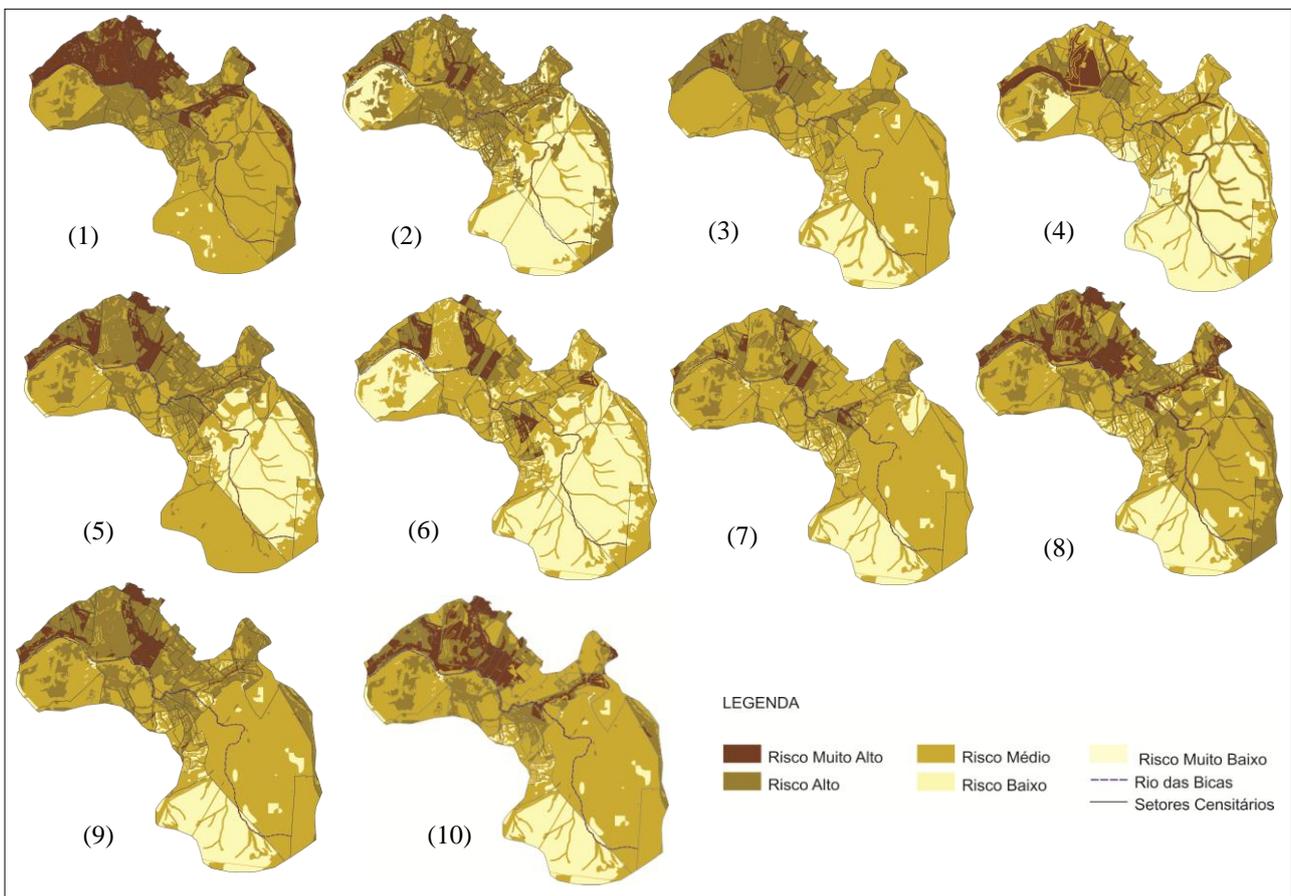


Figura 19:

- (1) Resultado do IDD para o cenário IDD-C1 (maior peso ao indicador Declividade);
- (2) Resultado do IDD para o cenário IDD-C2 (maior peso ao indicador Impermeabilização do Solo);
- (3) Resultado do IDD para o cenário IDD-C3 (maior peso ao indicador Disposição Inadequada de Resíduos);
- (4) Resultado do IDD para o cenário IDD-C4 (maior peso ao indicador Proximidade dos Cursos D'Água);
- (5) Resultado do IDD para o cenário IDD-C5 (maior peso ao indicador Renda);
- (6) Resultado do IDD para o cenário IDD-C6 (maior peso ao indicador Densidade Domiciliar);
- (7) Resultado do IDD para o cenário IDD-C7 (maior peso ao indicador Saneamento Inadequado);
- (8) Resultado do IDD para o cenário IDD-C8 (maior peso ao indicador Tráfego);
- (9) Resultado do IDD para o cenário IDD-C9 (maior peso ao indicador Revestimento de Vias) e
- (10) Resultado do IDD para o cenário IDD-C10 (peso igual a todos os nove indicadores).

No cálculo do IDD, alguns cenários evidenciam efeitos significativos decorrentes de uma inundação urbana, consequência do desempenho do sistema de drenagem urbana. Numa primeira análise, os resultados apresentados nos diversos cenários, mostram que as áreas de maiores índices estão concentradas nas regiões de maiores densidades populacionais, correspondendo a uma população de baixa renda, localizados próximos de canais naturais. Esta constatação pode ser conferida no cenário 4 em que os maiores índices ocorrem nas áreas que margeiam o lado esquerdo do Rio das Bicas, na área do exército, nas proximidades dos cursos d'água e do Parque Pindorama, onde existe uma grande quantidade de ocupações irregulares em áreas de mangue e inundáveis em períodos de chuva. As áreas de índice médio localizam-se próximos aos menores cursos d'água, incluindo as margens do Canal da Salina do Sacavém, que é ocupada por uma população de baixa renda. Observa-se que em alguns desses locais os cursos d'água desapareceram com o avanço da urbanização. Os menores índices ocorrem no parque estadual e nas regiões afastadas dos cursos d'água.

Em relação ao indicador “impermeabilização do solo”, os cenários estudados mostram que as áreas mais urbanizadas, com grandes áreas pavimentadas e impermeabilizadas estão mais sujeitas às inundações, agravadas pela ineficiência ou falha do sistema de drenagem urbana existente na região.

Os resultados dos cenários mostram também, que os bairros mais carentes de saneamento básico localizam-se próximos a cursos d'água. No restante da bacia o índice resultante apresentou-se um pouco elevado com exceção de uma área inserida no parque estadual.

Quanto aos indicadores Tráfego e Revestimento das Vias (cenários 4 e 5), os maiores índices ocorrem nas regiões mais urbanizadas e que contam com melhores serviços públicos, sociais e infraestrutura urbana. Nas demais áreas, observa-se que os indicadores sofrem alterações quando combinados com os outros indicadores.

O cenário 10, em que todos os indicadores têm o mesmo peso, apontam como áreas mais críticas as urbanizadas e localizadas em áreas de várzeas, predominando uma população pobre e carente de serviços de saneamento básico. Nessas regiões é comum a ocorrência de inundações até mesmo em períodos de chuvas pouco intensas.

Diante os resultados obtidos, entende-se que há necessidade de algumas medidas no intuito de diminuir o risco de alagamento em áreas urbanas. Dentre essas medidas destaca-se uma mudança de paradigma em relação às práticas de drenagem urbana de forma a favorecer a infiltração da água no solo e a sua retenção superficial, em substituição à lógica de implantação de estruturas de canalizações e retificações de rios, bem como, uma gestão mais eficaz do uso e controle do solo urbano. No caso de São Luís, recomendam-se estudos que confrontem os custos das intervenções estruturais na calha dos rios, com alternativas de retenção de vazões na bacia de drenagem, ou

ainda, o estudo de alternativas de reordenação do espaço, com a remoção de populações situadas em áreas críticas, sujeitas a riscos de inundações.

Recorte Espacial Para Aplicação do Modelo de Células - Modcel

Os resultados obtidos pelo cálculo do IDD foram confrontados com um mapa de alagamento produzido para uma sub-região de estudo, com o auxílio de uma ferramenta de modelagem matemática, o MODCEL. O modelo de células foi desenvolvido por Miguez (2001) e consiste na simulação do comportamento do escoamento superficial, durante eventos de inundação, quando as águas de macro-drenagem, composta por rios naturais ou canais e galerias de drenagem, extravasam ou não são coletadas de forma adequada pelo sistema de drenagem. A região selecionada para aplicação desse modelo é a Bacia do Canal do Coroado, que está inserida na Bacia do Rio das Bicas, conforme mostra na Figura 20. Na Figura 21 apresenta a mancha de inundação resultante da aplicação do MODEL.

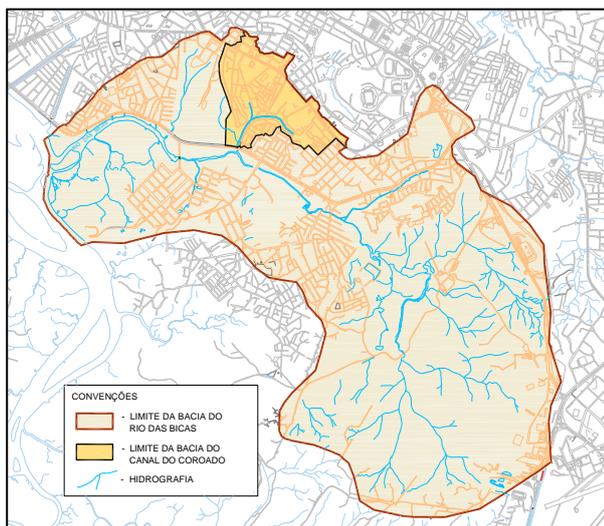


Figura 20: Localização da Bacia do Canal do Coroado.

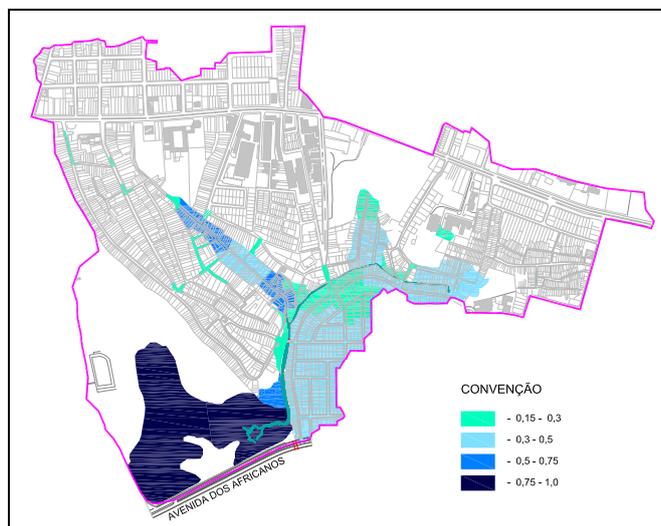


Figura 21: Planta com a mancha de inundação obtida para a Bacia do Canal do Coroado

Os resultados apresentados mostram que as áreas mais críticas de inundação localizam-se nas proximidades do curso d'água. Percebe-se uma urbanização intensa em toda a mancha o que agrava as consequências de cheias nessa área. Ressalta-se que esse resultado está em concordância com o apresentado no cálculo do IDD.

5 - CONCLUSÃO

Um ponto comum entre os resultados obtidos para os cenários propostos para o IDD, é que todos apontam para as regiões localizadas próximas aos cursos d'água como sendo as mais críticas de inundações. Dessa forma, reforça-se a ideia da necessidade de se criar estratégias que impeçam a ocupação dessas regiões, como também, das áreas verdes remanescentes, como formas de prevenção contra as inundações, envolvendo ações que auxiliem na gestão da drenagem urbana. A

avaliação quantitativa oferecida pelo índice IDD permite uma comparação entre zonas críticas, podendo ser utilizada para hierarquizar e justificar obras e investimentos públicos. Permite, ainda, fazer uma análise do quanto um indicador, efetivamente, apresenta-se com maior potencial de dano em relação aos outros, tendo em vista suas características específicas. Assim, é possível intensificar medidas de controle de inundação, específicas para regiões mais afetadas por consequência de uma determinada característica física ou social, da área afetada. Quanto à avaliação qualitativa dos resultados obtidos, por sua vez, permite definir soluções diferenciadas para pontos distintos em uma mesma região. A previsão de diversas soluções é importante, pois definem padrões voltados para reduzir efeitos específicos, que se propagam diferentemente no espaço, nas diversas áreas afetadas por inundação urbana.

BIBLIOGRAFIA

- CETESB (2003). *Análise, Avaliação e Gerenciamento de Riscos*, v. 01, São Paulo, 261p.
- COELHO, M.T.M. (2011). *Risco de Inundação devido a Fragilidade do Sistema de Drenagem Urbana em São Luís*. Tese de doutorado da UFRJ. Rio de Janeiro, 375p.
- IBGE. (2010). *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2000*. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pnsb/default.asp>>. Acesso em 21 de fevereiro de 2010.
- IBGE. (2010). *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2008*. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/default.shtm>. Acesso em 23 de novembro de 2010.
- IBGE. (2010). *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2010*. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br>. Acesso em 23 de novembro de 2010.
- MENDOZA, G.A.; MACOUN, P. (1999). *The Criteria and Indicators Toolbox Series*. In: Guidelines for Applying Multi-Criteria Analysis to the Assessment of Criteria and Indicators, v. 9, Center for International Forestry Research, pp. 9-18.
- MIGUEZ, M.G. (2001). *Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas*. Tese de Doutorado, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 310p.
- SAATY, T.L. (1977). *A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures*. In: Journal of Mathematical Psychology, v. 15, pp. 234-281.
- SÃO LUÍS. *Prefeitura Municipal. Plano Diretor*. São Luís, 1992.
- ZONENSEIN, J. (2007). *Índice de risco de cheia como ferramenta de gestão de enchentes*. Dissertação de Mestrado em Ciências Em Engenharia Civil. COPPE /UFRJ, Rio de Janeiro, 117p.