

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

SUSCEPTIBILIDADE A INUNDAÇÕES NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Francis Martins Miranda¹; Osvaldo Moura Rezende¹; Matheus Martins de Sousa¹; Ana Carolina Pitzer Jacob², Anna Beatriz Ribeiro da Cruz de Franco³; Antônio Krishnamurti Beleño de Oliveira³ & Marcelo Gomes Miguez³.

RESUMO – O presente estudo apresenta a aplicação do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações no estado do Rio de Janeiro sob cenários hipotéticos de elevação do nível médio do mar e incremento da precipitação, sendo este último de representado forma indireta. Diante da complexidade do desenvolvimento de modelos hidrodinâmicos robustos para todas as bacias integrantes de uma região de estudo, a avaliação da susceptibilidade do meio físico a inundações caracteriza-se como uma ferramenta de análise preliminar capaz de fornecer subsídios ao planejamento urbano e gestão do risco de inundações. Os resultados para o estado do Rio de Janeiro estão apresentados com base na extensão territorial e número de habitantes segundo as classes de susceptibilidade do índice. Como resultados comparativos entre o cenário atual e o cenário futuro 4, as áreas classificadas como *muito alta* susceptibilidade aumentam 55% em extensão, passando de 731 para 1140 km² e recebem um incremento de 84% no número de pessoas, passando de 675 mil para 1,24 milhões de habitantes.

ABSTRACT– The present study presents an application of the Index of Susceptibility of the Physical Environment to Floods in the state of Rio de Janeiro under hypothetical scenarios of elevation of the average sea level and increment of precipitation, the latter being represented indirectly. In face of the complexity of the development of robust hydrodynamic models for all basins in a study region, the assessment of the susceptibility of the physical environment to floods is characterized as a preliminary analysis tool capable of providing subsidies for urban planning and flood risk management. The results for the state of Rio de Janeiro are presented based on the territorial extension and number of inhabitants according to the susceptibility classes of the index. As comparative results between current and future 4 scenario, areas classified as very high susceptibility increase by 55% in extent, from 731 to 1140 km² and receive an increase of 84% in the number of inhabitants, from 675 thousand to 1.24 million inhabitants

Palavras-Chave – Susceptibilidade a Inundações, Mudanças Climáticas, Estado do Rio de Janeiro

INTRODUÇÃO

A eficiência da transformação da chuva em vazão durante um evento de precipitação em uma bacia hidrográfica está associada ao conjunto de características fisiográficas, como por exemplo, tipo, grau de desenvolvimento e percentagem de cobertura vegetal; tipo de uso, ocupação e grau de

1) Afiliação: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Ambiental PEA.

2) Afiliação: Aquafluxus Consultoria Ambiental em Recursos Hídricos.

3) Afiliação: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Civil PEC/COPPE

impermeabilização do solo, rugosidade, declividade, condição inicial de umidade, topografia, geologia, vazão líquida e sólida, geomorfologia fluvial, presença de aterros e intervenções em cursos d'água, dentre muitos outros.

De maneira geral, a incorporação de todas as características em um estudo detalhado sobre inundações em uma bacia constitui tarefa minuciosa e de alta complexidade, uma vez que demanda bases atualizadas na escala do lote e significativo esforço técnico-computacional incluindo modelagens hidrológicas e hidrodinâmicas.

Entretanto diversos estudos vêm sendo realizados com objetivo de mapear a susceptibilidade (ou propensão) a inundações a partir de um conjunto reduzido de indicadores (Kazakis, Kougiaris and Patsialis, 2015; Tehrany *et al.*, 2015). O reconhecimento de fatores preponderantes foi utilizado para o desenvolvimento de um índice para o meio físico aplicado à cidade do Rio de Janeiro no contexto do Suporte ao Plano de Adaptação às Mudanças Climáticas da Cidade do Rio de Janeiro (La Rovere and Sousa, 2017) e, posteriormente, no Plano de Adaptação às Mudanças Climáticas do Estado do Rio de Janeiro (Margulis *et al.*, 2018).

O denominado Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI) (Miranda, 2016) foi desenvolvido com base em uma metodologia multicritério em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Caracteriza-se como potencial ferramenta para o planejamento urbano, uma vez que identifica e hierarquiza o território ao destacar as áreas dentro de uma unidade física ou administrativa mais sujeitas a falhas da rede de drenagem.

As alterações nos padrões climáticos tendem a intensificar a frequência e magnitude de eventos extremos, colocando novas áreas em situações de perigo e populações em exposição. Ao incorporar parâmetros que representam o aumento do nível médio do mar (NMM) e cenários de intensificação da precipitação, foram concebidos cenários futuros de susceptibilidade a inundações.

Dessa forma, o presente estudo apresenta a aplicação do ISMFI no estado do Rio de Janeiro, considerando cenários de mudanças nos padrões climáticos. Caracterizado pelo contraste de extensas planícies fluviais e fluviomarinhas com o relevo escarpado da Serra do Mar, o estado é marcado por eventos intensos de inundações distribuídos por todas suas Regiões Hidrográficas (RH).

METODOLOGIA

O método multicritério pode ser definido por como uma metodologia analítica passível de construções, tanto qualitativas quanto quantitativas. A partir da aplicação de métodos de pontuação e de ponderação, informações de diferentes naturezas são convertidas para uma escala de medição comum e, em seguida, agregadas para fornecer um indicativo geral do desempenho. Com isto, opções alternativas podem ser comparadas com base no seu desempenho relativo (ANDJELKOVIC, 2001).

A unidade geográfica de estudo para construção dos indicadores e consolidação do índice foi o *raster* com resolução espacial horizontal de 30 m do projeto TOPODATA/INPE (Valeriano and Rossetti, 2011). As etapas de construção do índice estão sintetizadas no fluxograma da Figura 1.

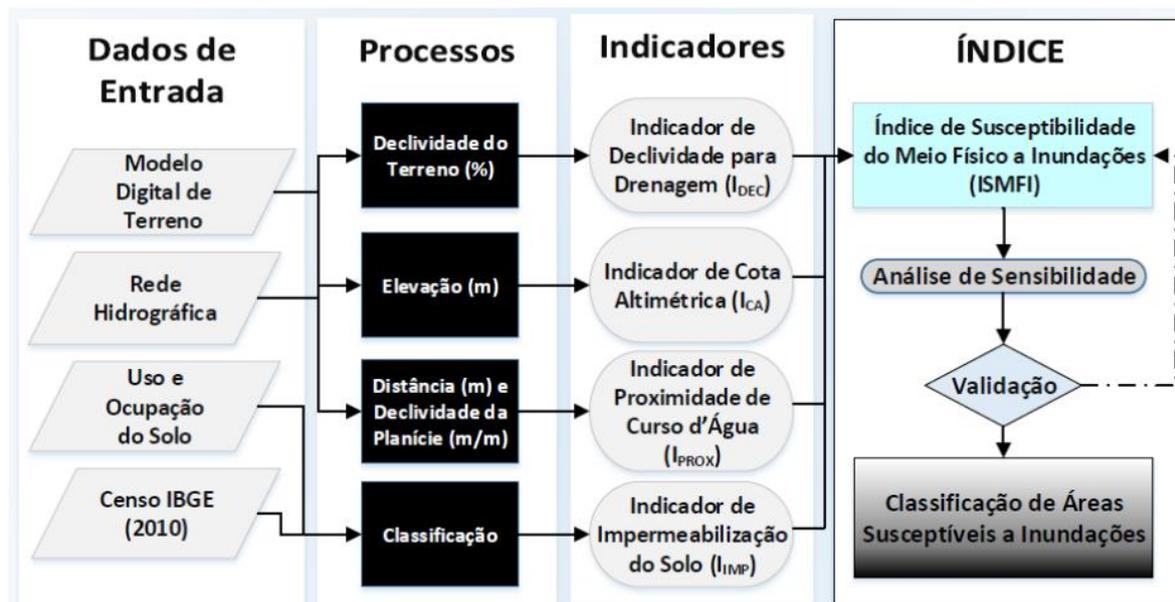


Figura 1 – Fluxograma metodológico do ISMFI. Fonte: Adaptado de Miranda (2016)

A formulação do índice é dada pela combinação de um produtório e um somatório, conforme apresentado na Equação 1. O processo de definição dos pesos atribuídos para cada indicador está descrito em Miranda (2016).

$$ISMFI = I_{DEC}^{0,25} * (0,2 * I_{CA} + 0,4 * I_{IMP} + 0,4 * I_{PROX})^{0,75} \quad \text{Equação 1}$$

A caracterização dos indicadores integrantes do ISMFI e seus respectivos parâmetros estão sintetizados nos itens a seguir.

Indicador de Impermeabilização do Solo - IIMP

O IIMP procura hierarquizar e representar áreas com diferentes tipos de uso do solo quanto ao grau de impermeabilização, sinalizando regiões com maior potencial de geração e acúmulo de escoamentos superficiais. Para a construção do indicador foi utilizado o mapa de uso do solo do INEA (2013). Para cada classe de uso foi atribuído um valor de coeficiente de *runoff*, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classes de uso do solo e valores do IIMP. Fonte: Miranda (2016)

Classe de Uso	IIMP	Classe de Uso	IIMP
Água	100	Restinga	30
Áreas Úmidas	95	Vegetação Secundaria Inicial	30

Classe de Uso	IIMP	Classe de Uso	IIMP
Mangue	90	Mata Atlântica	20
Afloramento Rochoso	80	Cordões Arenosos	10
Salinas	80	Dunas	10
Nuvem	50	Áreas Urbanas	
Solo Exposto	50		
Sombra	50	Baixa Densidade	50
Pastagem	35	Média Densidade	70
Agricultura	30	Alta Densidade	90

Indicador de Declividade para Drenagem - IDEC

Nesse indicador, o território é classificado em função de sua declividade para o escoamento superficial. Para aplicação do IDEC se elabora, inicialmente, um mapa de declividades do terreno onde a variação máxima de declividade entre os 9 pixels vizinhos é atribuída a célula central (Burrough and McDonell, 1998).

Em seguida, faixas de declividade são hierarquizadas quanto a sua eficiência na drenagem a partir de referências bibliográficas normativas e publicações científicas (Brasil, 1979; Kazakis, Kougias and Patsialis, 2015; Tehrany *et al.*, 2015).

Diferentemente de sua metodologia original (Miranda, 2016; La Rovere and Sousa, 2017), o IDEC aplicado ao ERJ apresenta novas faixas de declividades: (0 – 1,5 %) ao invés de (0 – 0,5 %) e a introdução da faixa (3,0 – 5,0 %) de forma a melhor representar a escala espacial do ERJ. A Tabela 2 apresenta os valores do indicador com base nos intervalos de declividade do terreno.

Tabela 2- Faixas de declividade e valores para o IDEC.

Categorias	Faixas de Declividade (%)	Indicador de Declividade para Drenagem - IDEC
Deficiente	0 - 1,5	100
Aceitável	1,5 - 3,0	75
Boa	3,0 - 5,0	50
Muito Boa	5,0 - 8,0	25
Ótima	Maiores que 8	0

Indicador de Cota Altimétrica Absoluta - ICA

Geralmente os terrenos em cotas próximas ao nível do mar apresentam baixa eficiência na condução e capacidade de descarga, podendo ainda ter essas características agravadas pelas oscilações de maré, restringindo-se, assim, a saída de drenagem e causando efeito de remanso em canais de drenagem.

Dessa forma, o ICA tem como objetivo classificar o território quanto a sua cota altimétrica em relação ao nível médio do mar. Como forte característica geomorfológica do ERJ destaca-se o contraste entre os relevos acentuados e as extensas planícies fluviomarinhas.

A Fundação Rio-Águas define, de forma geral, como cota segura para urbanização a cota absoluta de 2 m (RIO-ÁGUAS, 2015). O estado, no Projeto Iguaçu, região de baixada costeira com influência do mar, definiu cotas de segurança também em 2 m.

Tabela 3 – Valores do ICA.

Intervalos de Cota (m)	Valores do ICA
Cota \leq 2,0	100
2,0 < Cota \leq 3,0	75
3,0 < Cota \leq 4,0	50
4,0 < Cota \leq 5,0	25
\geq 5,0	0

Indicador de Proximidade de Curso d'Água - IPROX

Diferente do Indicador de Declividade para Drenagem (IDEC), que analisa a declividade média do terreno, o IPROX considera a declividade média das áreas próximas em direção ao curso d'água e sua respectiva distância, buscando representar as características do talvegue, bem como o acesso do excedente pluvial para as planícies adjacentes. Os valores do IPROX em função da distância e da declividade do território em relação ao curso d'água mais próximo estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores para o Indicador de Proximidade de Curso d'Água.

Distância (m)	Declividade (%)					
	até 1.5	1.5 - 3.0	3.0 - 5.0	5.0 - 8.0	8.0 - 30.0	Maior que 30
100	100	100	75	50	25	0
200	100	75	50	25	0	0
300	75	50	25	0	0	0
400	50	25	0	0	0	0
500	25	0	0	0	0	0
Maior que 500m	0	0	0	0	0	0

Cenários Futuros

Ao todo foram desenvolvidos 5 cenários de estudo:

- Cenário Atual de uso e ocupação do solo e NMM IBGE Imbituba – SC.
- Cenário Futuro 1 – Inclusão de todo território com cotas menores ou iguais a cota 3 m (IBGE) como faixa mais crítica no Indicador de Cota Altimétrica Absoluta, com função de representação do aumento de 1m no NMM e maior influência da variação da maré no sistema de drenagem.
- Cenário Futuro 2 – Cen. Futuro 1 + aumento de 20% dos valores de *runoff* do indicador de IIMP;
- Cenário Futuro 3 – Cen. Futuro 1 + aumento de 30% dos valores de *runoff* do indicador de IIMP.

- Cenário Futuro 4 – Cen. Futuro 1 + aumento de 40% dos valores de *runoff* do indicador de IIMP.

O incremento nos valores de escoamento superficial atua como proxy na representação de tendências de geração de maiores volumes sob condições de aumento da intensidade da precipitação.

RESULTADOS

Após o cálculo dos valores de cada indicador por pixel do raster, estes foram combinados segundo a Equação 1 para dar origem ao ISMFI. De forma a não tornar a apresentação de resultados exaustiva, estão apresentados os resultados espacializados do índice apenas para os cenários Atual e Futuro 4 nas Figura 2 e Figura 3, respectivamente.

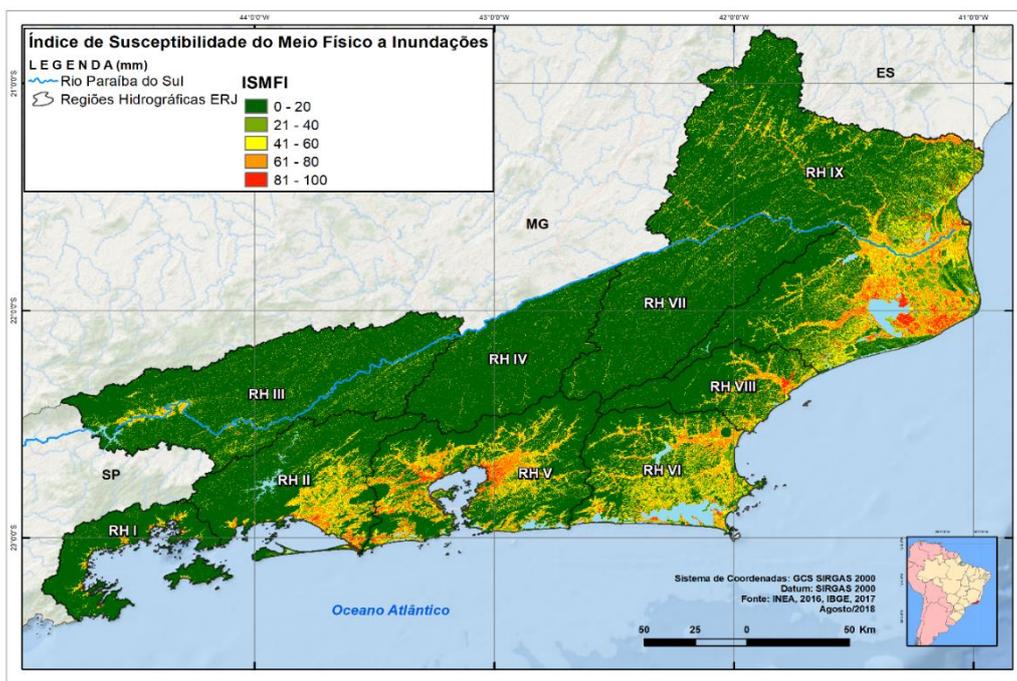


Figura 2 – Resultado do ISMFI para o estado do Rio de Janeiro no Cenário Atual.

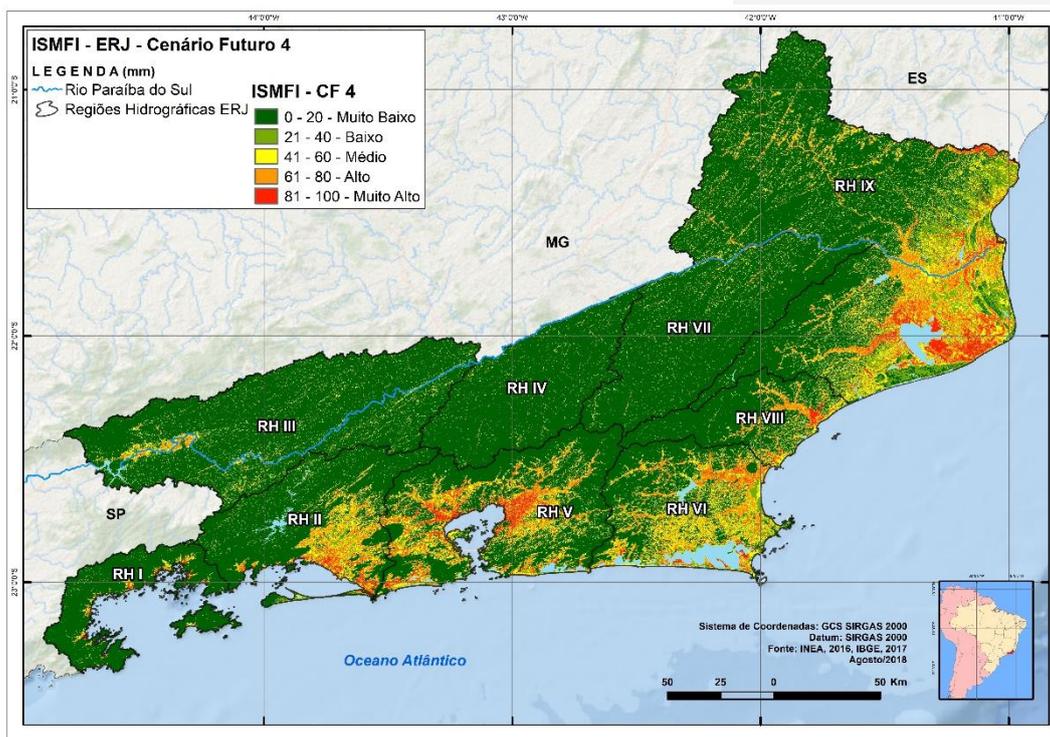


Figura 3 – Resultado do ISMFI para o estado do Rio de Janeiro no Cenário Futuro 4.

Como forma de fornecer subsídios para o planejamento urbano frente mudanças hipotéticas nos padrões climáticos, foram calculadas a extensão territorial e população de acordo com as faixas do ISMFI, conforme apresentado na Figura 4.

Cabe ressaltar que não foram realizados estudos de projeção populacional ou definidos vetores de crescimento urbano para cada um dos municípios integrantes do estado. Isto é, a população no cenário futuro é a mesma do cenário atual.

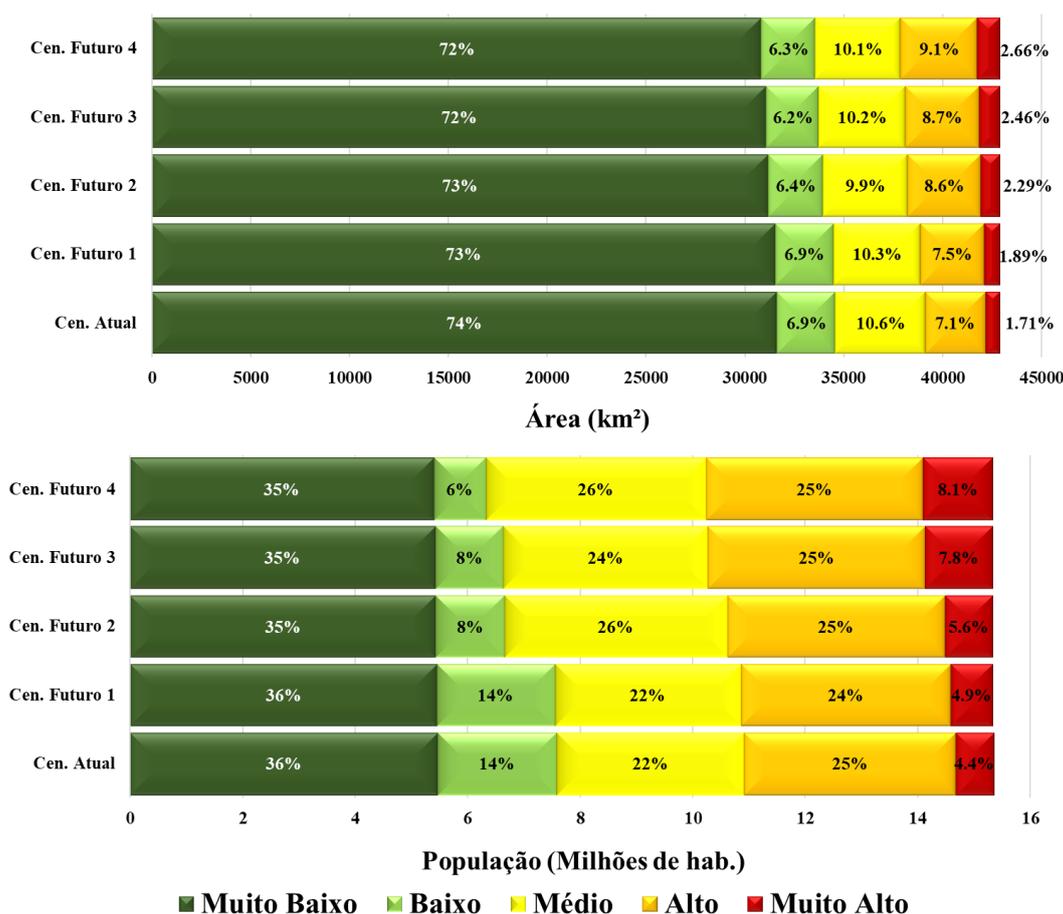


Figura 4 – Área e População em função das classes do ISMFI no ERJ.

CONCLUSÕES

Os resultados da avaliação da susceptibilidade a inundações no estado do Rio de Janeiro sob cenários de mudanças do clima, mostram uma situação grave para o estado fluminense. As áreas classificadas com muito alta susceptibilidade aumentam 55% em extensão, passando de 731 para 1140 km² e ganhando um incremento de 84% no número de pessoas, passando de 675 mil para 1,24 milhões de habitantes, quando se comparado o cenário atual com o cenário futuro 4.

Reforça-se a característica do índice de avaliação preliminar sendo capaz de orientar o processo de ocupação, a concepção de medidas estruturais e implementação de medidas não estruturais. Entretanto, informações como tempo de permanência, altura e extensão das lâminas de inundação, assim como a definição de parâmetros para projetos de engenharia hidráulica, devem ser obtidos por meio da aplicação de ferramentas de modelagem hidrológica e hidrodinâmica dos escoamentos.

A não consideração das projeções populacionais e vetores de crescimento urbano tendem a subestimar os valores de população habitando as áreas classificadas como mais susceptíveis do índice, o que sugere um aprofundamento do estudo de forma a obter resultados mais precisos.

REFERÊNCIAS

- Brasil (1979) ‘Lei de Parcelamento e Uso do Solo nº6766’.
- Burrough, P. A. and McDonell, R. A. (1998) ‘Principles of Geographical Information Systems’, *Oxford University Press*, p. 190.
- Kazakis, N., Kougiyas, I. and Patsialis, T. (2015) ‘Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope-Evros region, Greece’, *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 538, pp. 555–563. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.055.
- Margulis, S. *et al.* (2018) *Plano de Adaptação do Estado do Rio de Janeiro às Mudanças Climáticas*. Rio de Janeiro.
- Miranda, F. M. (2016) *Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações como Ferramenta para o Planejamento Urbano*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- La Rovere, E. and Sousa, D. S. (2017) *Estratégia de Adaptação às Mudanças Climáticas da Cidade do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro. Available at:
http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/6631312/4179912/ESTRATEGIA_PORT.pdf (Accessed: 14 May 2019).
- Tehrany, M. S. *et al.* (2015) ‘Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types’, *CATENA*. Elsevier, 125, pp. 91–101. doi: 10.1016/J.CATENA.2014.10.017.
- Valeriano, M. M. and Rossetti, D. F. (2011) ‘Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data’, *Applied Geography (Sevenoaks)*, v. 32, pp. 300–309.