

EIXO 3: INTERVENÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA (URBANO-AMBIENTAL)

As intervenções sobre a bacia hidrográfica devem ser avaliadas a partir de critérios urbano ambiental, cuja perspectiva é de atuar na causa das inundações, de modo a reduzir as consequências sobre as linhas de água e nas zonas marginais.

Assim, recorre-se a avaliação de quatro dimensões que sejam associadas ao controle de sedimentos, da permeabilidade, de questões urbanísticas e ao risco hidráulico das inundações.

Alinhando as perspectivas de Lima et al., (2024); Enu et al., (2025), a partir da bacia hidrográfica, pode-se proporcionar melhorias no controle da produção de sedimentos, da qualidade da água e da biota aquática, bem como da gestão sustentável das inundações.

Para tanto, recorre-se a estimativa da produção de sedimentos pelo método (R)USLE (I_{PS}) (Lisboa et al., 2019), do índice de permeabilidade (I_{PM}) (Veról et al., 2019), do zoneamento urbano de uso e ocupação do solo (I_{ZU}), e da redução do risco hidráulico (I_{RH}) (Veról et al., 2019).

Estas condições foram associadas a critérios, que serão avaliados de forma pondera, de modo a constituir as prioridades de intervenção urbano e ambiental, sendo expresso pelo índice:

$$IPI_{(UA)} = I_{PS}w_{PS} + I_{PM}w_{PM} + I_{RH}w_{RH} \quad (1)$$

Onde I_{PS} e w_{PS} são respectivamente o indicador e peso que refere sobre o potencial de produção de sedimentos entregues as linhas de água. O termo I_{PM} e w_{PM} avalia e pondera o grau de permeabilidade da bacia. O componente I_{RH} e w_{RH} avalia e pondera o risco hidráulico, de modo que todos como critério para priorizar intervenções na bacia hidrográfica.

Assim, do ponto de vista urbano e ambiental, assumiu-se que a intervenção na bacia hidrográfica deve considerar critérios que se possa priorizar ações para gerir e mitigar impactos das inundações urbanas em quatro classes: Imediata, corretiva, preditiva e preventiva, descritas pela **Tabela 1**.

As referidas ações consideram implementar, elaborar e/ou revisar planos de regularização fundiária, de uso e ocupação do solo e de controle de sedimentos, bem como propor ou revisar (caso já esteja regulamentado) taxas de drenagem para habitações e lotes que ocupem a zona marginal ou toda a bacia hidrográfica (e.g. Lisboa et al., 2012).

Tabela 1. Enquadramento e caracterização do grau de prioridade de intervenção urbana-ambiental.

Intervenção	Necessidade de ações correspondente a prioridade de intervenções urbanas e ambientais (na bacia hidrográfica)
Imediata $1 \leq IPI_{(T)} \leq 0,71$ 	Implementação ou revisão (caso existente) de plano de regularização fundiária (que inclua lotes irregulares) e de urbanização que considere a promoção de áreas verdes, lazer e completo mobiliário urbano. Implementação ou revisão (caso existente) de plano de uso e ocupação do solo, adequando parâmetros urbanísticos, nomeadamente a taxa de ocupação-TO, aumentando o percentual de áreas permeáveis de lotes que ocupam zonas marginais à linha de água. Implementação ou revisão (caso existente) do plano de controle de sedimentos que possam atuar sobre obras civis e no processo de urbanização com proposição de intervenções estruturais (bacias de detenção). Proposição de taxa de drenagem para habitações e lotes que ocupam a zona marginal à linha de água.
Corretiva $0,7 \leq IPI_{(T)} \leq 0,5$ 	Elaboração ou revisão (caso já existente) de plano de regularização fundiária (que inclua lotes irregulares) e de urbanização, que considere a promoção de áreas verdes, lazer e completo mobiliário urbano. Revisão no plano de uso e ocupação do solo revisando parâmetros urbanísticos, fiscalizando cumprimento quanto do percentual de áreas permeáveis de lotes que ocupam toda a zona marginal. Elaboração ou revisão (caso já existente) do plano de controle de sedimentos que possam atuar sobre obras civis e no processo de urbanização, com proposição de intervenções estruturais (bacias de detenção) e não-estruturais (aumento da área verde em toda a bacia e proteção das margens das linhas de água com vegetação ripária). Proposição de taxa de drenagem para habitações e lotes que ocupam toda a zona marginal à linha de água.
Preditiva $0,51 \leq IPI_{(T)} \leq 0,3$ 	Elaboração ou revisão (caso já existente) de plano de regularização fundiária (que inclua lotes irregulares) e de urbanização, que considere aumento de áreas verdes, lazer e completo mobiliário urbano. Revisão no plano de uso e ocupação do solo revisando parâmetros urbanísticos, fiscalizando o cumprimento quanto do percentual de áreas permeáveis de lotes que ocupam toda a bacia hidrográfica. Revisão do plano de controle de sedimentos que possam atuar sobre obras civis, com proposição de intervenções não-estruturais (aumento da área verde em toda a bacia hidrográfica). Proposição de taxa de drenagem para habitações e lotes que ocupam toda a bacia hidrográfica.
Preventiva $0,31 \leq IPI_{(T)} \leq 0$ 	Revisão de plano de urbanização que considere manutenção de áreas verdes, lazer e revitalização do mobiliário urbano. Revisão do plano de uso e ocupação do solo, mantendo parâmetros urbanísticos, quanto ao percentual de áreas permeáveis de lotes que ocupam toda a bacia hidrográfica. Revisão do plano de controle de sedimentos que possam atuar sobre obras civis, com proposição de intervenções não-estruturais (aumento da proteção das margens das linhas de água com vegetação ripária). Revisão de taxa de drenagem para habitações e lotes que ocupam toda a bacia hidrográfica.

Assume-se que, ao implementar estas ações pode-se gerir as causas das inundações e da contaminação dos cursos de água, pela regulação da quantidade e qualidade da água e dos sedimentos na bacia hidrográfica sobre a linha de água (Tucci e Genz, 1995; Morelli e Barbassa, 2009). Ainda que para tal regulação alguns parâmetros devam ser definidos, mapear a estimativa da produção de sedimentos, zoneamento urbano e do risco hidráulico de inundações na bacia hidrográfica são critérios suficientes para mapear a prioridade de intervenção urbana e ambiental.

PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

A concepção da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) (Wischmeier e Smith, 1978) e da versão revista [(R)EUPS] proposta por Renard et al., (1997), foram concebidas para realizar a estimativa da perda anual média de solo (A), por um período em bacias hidrográficas. Ambas são expressas por formulação que conjuga seis fatores:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (2)$$

Onde “ R ” é o fator energético de chuvas ($\text{MJha}^{-1}\text{mmh}^{-1}$); “ K ” está relacionado a erodibilidade do solo ($\text{thMJ}^{-1}\text{mm}^{-1}$), “ LS ” é o fator fisiográfico, “ C ” é relativo uso e manejo do solo, e “ P ” é o fator de prática conservacionistas. Os fatores “ LS ”, “ C ” e “ P ” são adimensionais, obtidos pela razão entre perdas de solo num local específico e perdas de solo na unidade EUPS (i.e. 22,1 m de comprimento, com 9% inclinação, sem vegetação, com áreas de cultivo ao longo do declive).

Contudo, “ A ” não considera a deposição do solo. Assim, para estimar essa deposição consideram-se os sedimentos entregues nas linhas de água, ou seja, a produção de sedimentos (I_{PS}), função do coeficiente de produção de sedimentos (CPS) a partir de:

$$I_{PS} = A \times CPS \quad (3)$$

A classificação dos graus de perda potencial anual de solo foi definida a partir da proposta de Irvem et al., (2007), o qual foi igualmente definido para o potencial de produção de sedimentos entregues às linhas de água pela Tabela 2.

Tabela 1. Estimativa da produção de sedimentos entregues às linhas de água.

A e I_{PS} (t/ha)	Caracterização	I_{PS}	Caracterização
<5	Muito Baixo - MB	0 – 0,30	Baixo potencial de produção de sedimentos e entrega a linha de água com capacidade de assoreamento
5 - 12	Baixo – B		Médio potencial de produção de sedimentos e entrega a linha de água com capacidade de assoreamento
12 - 50	Moderado – M	0,30 – 0,60	Alto potencial de produção de sedimentos e entrega a linha de água com capacidade de assoreamento
50 - 100	Grave – G	0,60 – 1,00	Alto potencial de produção de sedimentos e entrega a linha de água com capacidade de assoreamento
100 - 200	Muito Grave – MG		
> 200	Gravíssimo - GR		

Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Irvem et al., (2007).

Fu et al., (2005) referiu que o CPS de bacias hidrográficas é condicionado por fatores geomorfológicos, hidrológicos, ambientais e associados à própria bacia, quantificado pela seguinte equação:

$$CPS = a(A_d)^{-b} \quad (4)$$

Onde “ A_d ” é a área de drenagem da bacia. E, “ a ” e “ b ” são coeficientes aferidos por Vanoni (1975); Boyce (1975); USDA (1979). Assim, I_{PS} está condicionado pelas estimativas de variáveis que compõem os fatores do modelo (R)EUPS.

O comprimento da encosta (L) e declividade média do terreno (S), e o fator de uso e manejo do solo (C) e de práticas conservacionistas (P) se apresentam com forte variabilidade espaço-temporal (Lisboa et al., 2017).

O comprimento “ L ” pode ser obtido conforme Paiva et al., (1995) a partir da quarta parte da largura do retângulo equivalente (Le), uma vez que a parcela é substituída pela bacia hidrográfica, em que a largura de “ Le ” é expressa por:

$$L = Le = \frac{k_c \cdot \sqrt{A_b}}{1,128} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{k_c} \right)^2} \right] \quad (5)$$

Onde “ A_b ” é a área da bacia (m^2); e “ k_c ” é o coeficiente de compacidade obtido por:

$$k_c = 0,282 \cdot \frac{P_e}{\sqrt{A_b}} \quad (6)$$

Em que P_e é o perímetro da bacia, expressa em metros (m). A declividade pode ser obtida pela equação proposta por Renard et al., (1997), função do ângulo de declive de cada célula (θ) igual a:

$$S = 10,8 \cdot \text{sen} \theta + 0,03 \rightarrow \text{declividade} < 9\% \quad (7)$$

A conjugação dessas duas variáveis produz o fator fisiográfico (LS) estimado por Wischmeier e Smith (1978):

$$LS = \left(\frac{L}{22,1} \right)^m \cdot (0,065 + 0,0454 \cdot S + 0,0065 \cdot S^2) \quad (8)$$

Em que “ m ” é o expoente declive-comprimento que, de acordo com Mills et al., (1985) pode assumir valor em função da declividade iguais a: 0,2 ($S < 1\%$), 0,3 ($1 > S < 3\%$), 0,4 ($3 < S < 5\%$) e 0,5 ($S > 5\%$).

O fator “ C ” foi conceituado por Wischmeier e Smith (1978) como a relação esperada entre: perdas de solo de um terreno cultivado em dadas condições e as perdas correspondentes do terreno mantido continuamente descoberto e cultivado.

Por sua vez, o fator “ P ” representa a razão entre a perda de solo que ocorre em dada prática conservacionista e aquela que ocorre para cultivos no sentido do declive máximo do terreno (plantio morro abaixo). Portanto, esse fator é um ponderador de “ C ” em situações especiais de uso de manejo do solo.

Esses fatores quando analisados individualmente buscam a interpretação mais adequada da produção agrícola conservacionista. No entanto, Stein et al., (1987) analisaram “C” e “P” conjuntamente estabelecendo valores em função de diferentes grupos e categorias de vegetação. Esses autores concluíram que os referidos fatores possuem forte correlação entre si de tal maneira que, não se pode analisá-los individualmente.

A perda anual de solo em uma bacia é influenciada, quer pelo total da precipitação do mês considerado (P_t), quer por precipitação média anual (P_{ma}), cujo produto final de ambas as considerações resulta no fator “R”. Kim et al., (2005) considerou P_{ma} para determinar “R” em países de clima tropical, expresso por:

$$R = 587,8 - 1,219xP_{ma} + 0,004105xP_{ma}^2 \quad (9)$$

A conjunção das variáveis relacionadas à morfologia e química produz termos dependentes, nomeadamente “M” e “r”, componentes da equação (10) que quantifica o fator “K”. Essa equação é resultado do trabalho de Levy (1995) que, baseado na estimativa indireta pelo “*Nomograma de Wischmeier*” formulou:

$$K = 7,5.10^{-6}.M + 44,8.10^{-4}.p - 6,3.10^{-2}.DMP + 10,4.10^{-3}.r \quad (10)$$

O valor de “M” é obtido a partir de valores granulométricos, pela soma de % de silte e % de areia fina, multiplicados pela soma de % de silte, % de areia fina e % de areia grossa. O termo “r” é referente ao produto do % matéria orgânica e % areia grossa.

O termo “p”, obtido pelo referido “Nomograma”, é relacionado por cinco classes de permeabilidade: 1) rápida; 2) moderada a rápida; 3) moderada; 4) moderada a lenta; 5) lenta; 6) muito lenta. O termo DMP é obtido pela equação (11), para partículas < 2 mm:

$$DMP = \sum C_i \cdot P_i \quad (11)$$

Em que C_i é referente ao centro de cada classe textual expresso em mm, obtido por meio de uma escala $\phi(phi)$ que pode ser consultada em Zaroni et al., (2006), no qual o “DMP” é igual a 0,65 (areia grossa), 0,150 (areia fina), 0,0117 (silte) e 0,00024 (argila). O termo “ P_i ” é relacionado a proporção da classe textual (g/g).

PERMEABILIDADE DA BACIA HIDROGRÁFICA E QUESTÕES URBANÍSTICAS

Veról (2013) referiu que, os efeitos da impermeabilização do solo na bacia hidrográfica podem ser avaliados pela relação entre a área permeável da bacia (A_p) e sua área total (A_{total}).

$$I_{PM} = \frac{A_p}{A_{total}} \quad (12)$$

Assim, quanto mais impermeável estiver a bacia, menor é a possibilidade de favorecimento da infiltração, havendo correspondente o aumento na parcela do escoamento superficial. Nesse caso, o indicador será pior quando se aproximar de zero “0”. E, quanto maior for a possibilidade de favorecer a infiltração na bacia, maiores o indicador se aproxima da unidade “1”.

Entretanto, assumindo que esta proposição metodológica adota a escala entre “0” e “1”, diferentemente do que foi proposto por Veról (2013), o referido indicador será aferido em conformidade ao coeficiente “*run-off*”. Desta forma, este critério está relacionado a avaliação de instrumentos urbanísticos, como a taxa de ocupação do solo (TO) de lotes que integram a bacia hidrográfica. Importa ressaltar que o “TO” é a relação entre a área total da edificação e área do lote.

Deste modo, em geral, assume-se que, quanto maior for o valor de “TO”, maior será o impacto das chuvas sobre o sistema de drenagem pluvial, posto que, há um proporcional aumento da área com potencial de ser construída.

Ainda que zoneamentos urbanos das cidades brasileiras considerem “TO” mínimo e básico, relacionado a diferentes formas de habitação (residencial, comercial, serviços e industrial), adota-se o valor de “TO” máximo ($TO_{máx}$) para avaliar o efeito deste parâmetro sobre intervenções na bacia hidrográfica, nomeadamente quanto a regulação do ciclo hidrológico, bem como da purificação da água e degradação de contaminantes (e.g., Naumann et al., 2018; Tóth et al., 2022). Assim, assumiu-se a seguinte definição (**Tabela 3**).

Tabela 3. Classe de renda e índice renda para aferir danos socioeconômicos das inundações.

$I_{PM} = TO_{máx}$	Caracterização
1,00-0,60	Potencial altamente desfavorável a desfavorável a permeabilização da área
0,60-0,30	Potencial moderadamente desfavorável a permeabilização da área
0,00-0,30	Potencial favorável à altamente favorável a permeabilização da área

Portanto, o indicador I_{ZU} caracteriza o potencial de permeabilização de lotes que integram a área da bacia hidrográfica. Deste modo, quanto maior o $TO_{máx}$ mais potencialmente desfavorável a área do terreno à permeabilização, em face a área total da edificação.

RISCO HIDRÁULICO DE INUNDAÇÕES

O conceito de risco hidráulico corresponde ao(s) dano(s) causado(s) por uma possível inundação (CIRF, 2006). Como proposto por Veról (2013), o índice de

risco hidráulico, tem conotação de “perigo”, ou seja, se refere a condição intrínseca do próprio alagamento, sem avaliar direta ou especificamente as consequências, mas considera apenas alagamentos nas áreas específicas de ocupação urbana, podendo haver danos associados.

Portanto, em geral, o referido indicador avaliará o grau de alagamento da bacia hidrográfica urbanizada, ao considerar o volume de alagamento no pico da cheia em relação ao volume total precipitado, sendo expresso por:

$$I_{RH} = \frac{V_a}{V_t} \quad (13)$$

Em que o termo “ V_t ” é o volume total da precipitação, calculado através do total precipitado (intensidade pluviométrica – I), da área (A) e do coeficiente de escoamento (C). E o termo “ V_a ” se refere ao volume de alagamento total na bacia no momento máximo do pico da cheia, expresso pela equação (14).

$$V_a = Alag_{(máx)} \times A_{arm} \quad (14)$$

Onde $Alag_{(máx)}$ é o alagamento máximo (nível de água no pico da cheia), e A_{armaz} se refere a área de armazenagem total na bacia. Assim, este critério considera a capacidade de drenagem da bacia hidrográfica, i.e., de não alagamento, diante de um evento de precipitação.

Este critério foi aplicado em quadrículas (“grid”) que integram a bacia hidrográfica, de modo que, a priori, pode-se adotar área de 40,000,0m² (200x200m). Assim, parte do pressuposto que, para uma quadrícula, se $V_a > V_t$ o risco hidráulico de inundações é alto ($I_{RH} = 1$). Assim, o risco é baixo quando o I_{RH} for inferior a 0,30, e moderado quando o referido índice estiver entre 0,30 a 0,60 ($0,30 \leq I_{RH} \leq 0,60$).

Neste contexto, convém adotar cenários que considerem na estimativa da intensidade pluviométrica (I), períodos de retorno para microdrenagem (entre 5 a 10 anos), bem como para macrodrenagem (20, 50 a 100 anos). Ainda que, quanto maior for o período de retorno, menor é o risco para a mesma vida útil de estruturas hidráulicas, como está sendo avaliado o risco hidráulico de inundações em bacia hidrográfica, maior importância pode ser atribuída ao cenário da macrodrenagem.

A atribuição da importância relativa dos critérios que compõem o $IPI_{(UA)}$ foi efetuada considerando atender os ODS, da ONU, nomeadamente quanto a “vida na água” e “cidades e comunidades sustentáveis”. Neste contexto, ainda que os rios urbanos apresentem menor magnitude hídricas quando comparado aos oceanos e mares, em termos de volume e vazão, mas que, entretanto, possam estar interconectados, é imprescindível conservar e utilizar de forma sustentável estes recursos hídricos e seus ecossistemas, alinhando-se ao que refere a ODS nº 14.



Assim, os critérios que referem sobre a produção de sedimentos, seguido da permeabilidade e zoneamento urbano, do ponto de visto sobre a taxa de ocupação do solo, além de atuarem na regulação do ciclo hidrológico, podem promover a qualidade da água e da biota aquática dos canais fluviais.

Entretanto, considerando apenas a perspectiva de tornar as cidades e comunidades mais seguras, resilientes e sustentáveis frente aos eventos de inundações urbanas, no âmbito de se atingir o ODS nº 11, pondera-se a importância do potencial de produção de sedimentos entregues a linhas de água, que podem assorear canais fluviais, e risco hidráulico.

Ainda que se tenha atribuído o critério associado a estimativa do potencial de produção de sedimentos como mais importante, a confrontação de importância entre critérios urbanos e ambientais deve ser continua, a fim de avaliar a prioridade de intervenções na bacia hidrográfica, de modo atribuir novos pontos de vistas. Assim, urbanistas e agentes públicos que atuem em organismos da administração pública na área do urbanismo e saneamento, podem acessar o link "[CALIBRAÇÃO DE PESOS](#)" para preencher um formulário de questionamentos sobre os critérios urbanos e ambientais.