

IV-159 – MAPEAMENTO DE CAMINHOS CRÍTICOS E GERENCIAMENTO DE ÁGUAS PLUVIAIS EM PROCESSOS DE POLUIÇÃO DIFUSA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

Gabriel Takaki Rieke⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná. Mestrando em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (PPGERHA/UFPR).

Alana Louise Werneck Lassen⁽²⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Paraná. Mestranda em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (PPGERHA/UFPR).

Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes⁽³⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná. Mestre em Engenharia Hidráulica pela Universidade Federal do Paraná. Ph.D pelo Civil and Environmental Engineering Program da University of Toronto. Professor Associado do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Paraná. Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA).

Nicolás Lopardo⁽⁴⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná. Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Engenheiro da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

Endereço⁽¹⁾: Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100 – Jardim das Américas - Curitiba - PR - CEP: 81530-000 - Brasil - Tel: (41) 99646-0761 - e-mail: gabriel.rieke@hotmail.com

RESUMO

O presente trabalho aborda a problemática da poluição difusa em áreas de manancial e propõe método de identificação dos potenciais caminhos críticos dos poluentes e análise de viabilidade de aplicação de Best Management Practices (BMP) de águas pluviais, tendo como estudo de caso a bacia de manancial do Passaúna, localizado na Região Metropolitana de Curitiba. O método proposto relacionou, inicialmente, a concentração dos poluentes SST (Sólidos Suspensos Totais), PT (Fósforo Total) e NT (Nitrogênio Total) por uso do solo. Em seguida, identificou-se, por meio de conceitos hidráulicos, o risco de poluição em determinada área e, posteriormente, os potenciais caminhos críticos a serem percorridos pelos poluentes até atingir o corpo hídrico. Esses resultados servem de auxílio para a gestão de recursos hídricos e apoio à tomada de decisão para intervenção na bacia. A viabilidade da realização de BMP's foi analisada levando em consideração o controle da poluição, além de critérios construtivos e econômicos. Dessa forma, propôs-se a aplicação de uma medida estrutural para uma das áreas de risco identificadas, realizando estudo adequado, projeto, orçamento e análise da influência dessa obra de engenharia no local em que se propôs a implementação. Constatou-se, no presente estudo, a influência do uso do solo na concentração de poluentes de uma certa região, além de compreender como se dá o escoamento superficial, carregados de partículas poluidoras, até atingir o corpo hídrico e verificou-se a eficiência da aplicação de BMP's como alternativa à diminuição da poluição difusa na bacia. O método aqui proposto deve servir como ferramenta importante no gerenciamento dos recursos hídricos, munindo os gestores de informações para que possam tomar as decisões mais adequadas no que diz respeito à qualidade da água, em especial em áreas de manancial.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão de Águas Pluviais, Poluição Difusa, Georreferenciamento, Manancial.

INTRODUÇÃO

O constante aumento da população, associado à sua concentração principalmente nas áreas urbanas, promove um aumento na demanda por água tratada, com condições para consumo. Em contrapartida, tem sido observada a deterioração da água, que é originada, dentre outros motivos, pela grande quantidade de poluentes gerados por esta população e que são lançados nos corpos hídricos. Somado a isso, o desenvolvimento das cidades tem provocado uma séria alteração na forma de uso do solo. Enquanto a diminuição da permeabilidade do solo provoca um aumento no volume e vazão de escoamento superficial, podendo causar cheias e inundações, o inconsequente uso do solo acarreta no acúmulo de substâncias nocivas ao consumo humano, que são carregadas pela água da chuva e lançada nos corpos receptores.

A ocorrência de todos esses fatores tem culminado na poluição dos corpos hídricos, enquanto a capacidade de depuração do mesmo não atende o alto nível poluente. Dessa forma, o aumento na demanda por água, ao passo que a oferta não cresce na mesma proporção, associado ao alto nível de poluição, tem gerado a falta deste recurso, além da queda de sua qualidade.

O problema apresentado é agravado pela falta de infraestrutura sanitária de sistema de esgotamento sanitário e, principalmente, de drenagem urbana. São diversos os casos em que as águas pluviais são apenas coletadas e lançadas nos corpos receptores sem nenhum tratamento ou dispositivo de controle, causando um grande impacto que, felizmente, ao longo dos anos, tem uma preocupação crescente. Além disso, o baixo índice de atendimento à população com redes coletoras de esgoto, juntamente com os vazamentos da rede, as ligações clandestinas de esgoto na galeria de águas pluviais, as ocupações irregulares, o uso do solo e tantos outros fatores contribuem para agravar o nível de poluição nos corpos hídricos.

Em geral, as soluções para poluições pontuais já são conhecidas e, até certo ponto, controladas. Em contrapartida, aquelas de fontes difusas ainda carecem de maior estudo e compreensão, principalmente nos países em desenvolvimento como é o caso do Brasil. Dessa forma, justifica-se o estudo de soluções para problemas de fontes não-pontuais, ainda mais quando se trata de áreas de mananciais, onde raramente são encontradas descargas poluentes concentradas. A criação de uma ferramenta computacional que identifique os potenciais locais de risco de poluição pode fornecer informações importantes que venham a servir de auxílio aos gestores hídricos. Além disso, a análise e compreensão dessa situação, aliados a um projeto adequado e correta aplicação de medidas como as BMP's se propõem a servir de auxílio para o gerenciamento das águas pluviais, em especial no controle dos poluentes carregados para os corpos hídricos.

OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é avaliar o impacto da poluição difusa na qualidade da água em áreas de manancial utilizando ferramenta de geoprocessamento e propor a aplicação de BMP's como medidas de controle em bacias de manancial. Neste estudo utilizou-se o manancial do rio Passaúna, na Região Metropolitana de Curitiba. Como objetivos específicos têm-se: (i) estimar o risco de concentração de poluentes gerada por fontes difusas nas áreas de mananciais em função do uso do solo; (ii) mapear os trajetos críticos prováveis de poluição causados pelo escoamento das águas pluviais; (iii) avaliar a aplicabilidade de BMP's no contexto geoespacial; (iv) analisar a viabilidade da implementação de BMP's na região de manancial; (v) dimensionar BMP's com análise de possíveis impactos causados pela solução proposta.

MATERIAIS E MÉTODOS

O método deste presente trabalho envolve conceitos da hidrologia básica e se baseou em trabalho de Ferreira (2016) que exibe uma análise similar da aqui apresentada. O passo-a-passo a ser aplicado na execução das ideias referidas está esquematizado na figura 1 e explicado detalhadamente ao longo deste capítulo, por meio da menção aos itens representados pelos número e letras, como mostrado na figura.

- **Dados espaciais da bacia hidrográfica**

Para se compreender a geoespacialização das bacias de manancial, são necessários dados acerca da hidrografia, curvas de nível, pontos cotados, tipo de solo e uso do solo, além das delimitações de microbacias (ou ottobacias) e de reservatórios – se houverem – e delimitações administrativas de municípios, bairros, entre outros (item A da figura 1, apresentada na figura 2). Nesta metodologia são aplicáveis dados na extensão .shp quando utilizados com o auxílio de softwares GIS e, para o estudo de caso, utilizado o software ArcGIS – aplicativo ArcMap, o qual georreferencia os dados.

Em uma breve explicação da utilização do software, pode-se dizer que é um transformador de dados tabelados em objetos espaciais localizados no espaço. Suas unidades básicas são pontos, linhas e polígonos. Esses elementos geram mapas temáticos providos de informações que contribuirão para a análise dos dados e auxiliarão nas tomadas de decisão.

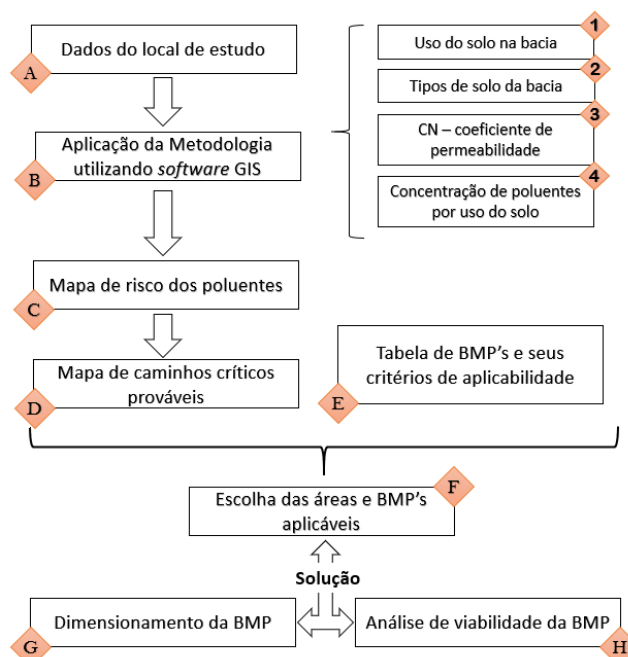


Figura 1: Fluxograma do Método.

No presente trabalho propôs-se o estudo de uma das bacias de manancial de captação de água da Região Metropolitana de Curitiba, Paraná. A bacia do Rio Passaúna, mostrada na figura 2, é um manancial de abastecimento público que se localiza nos municípios de Almirante Tamandaré, Campo Magro, Campo Largo, Curitiba e Araucária, localizadas no estado do Paraná, possuindo uma extensão territorial de 217 km² (SUDERHSA, 2002). O rio principal é o Rio Passaúna, afluente da margem direita do Rio Iguaçu, com 49,45 km de talvegue e na bacia são predominantes os usos rurais do solo, ainda que apresente parcela de uso urbano.

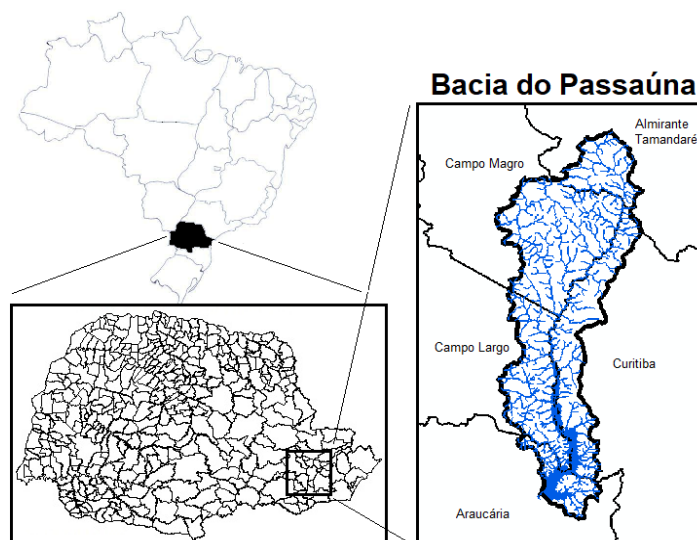


Figura 2: Localização da Bacia do Passaúna.

A água proveniente da bacia é captada pela Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar no reservatório construído por barragem de regularização de vazão nominal de 2000 L/s e bombeada até a Estação de Tratamento de Água – ETA Passaúna. A ETA tem capacidade de tratamento de 1800 L/s, com possibilidade de aumento por melhoria do sistema e contempla processos de floculação, decantação, filtração, fluoretação e desinfecção (SANEPAR, 2013).

- **Aspectos quantitativos sobre poluição difusa**

A poluição difusa está em processo de avanço de conhecimento, principalmente no Brasil. Em vista disso, não são usuais as informações de poluição em todas as localidades e para todo o tipo de uso e ocupação do solo. A base de dados utilizadas é retirada da bibliografia, em sua maioria internacional, ainda que se refiram a locais de condições climáticas, geográficas e peculiaridades dispare à área em estudo (item B4 da figura 1, apresentada na tabela 3).

As relações entre as concentrações de poluentes e os usos do solo serão apresentadas conforme as classificações internacionais destes parâmetros. É necessário, portanto, que o entendimento dos usos do solo encontrados na bibliografia seja ajustado aos padrões brasileiros. A interligação dos dados obtidos pela bibliografia e dos dados espaciais da bacia hidrográfica gera a informação-chave deste método: a estimativa das quantidades de poluentes totais geradas difusamente de acordo com cada tipo de solo (item C da figura 1, apresentada na tabela 4). Esta informação consiste na interposição da tabela de classificação regional de uso do solo (item B1 da figura 1) e das informações de concentração de poluentes gerada a partir de seu uso (item B4 da figura 1).

Sartori (2004) classificou os tipos de solo da EMBRAPA em quatro categorias, sendo estas conforme Ogrosky e Mockus (1964 apud SARTORI, 2004):

Grupo A: Solos com baixo potencial de escoamento, alta taxa de infiltração uniforme quando completamente molhados (mínima de 7,62 mm/h) e alta taxa de transmissão de água. Constituídos, em geral, de areia e cascalhos profundos e excessivamente drenados.

Grupo B: Solos com moderada taxa de infiltração quando completamente molhados (entre 3,81 e 7,62 mm/h) e moderada taxa de transmissão de água. Solos moderadamente profundos a profundos, moderadamente a bem drenados, com textura moderadamente fina a moderadamente grossa.

Grupo C: Solos com baixa taxa de infiltração quando completamente molhados (entre 1,27 e 3,81 mm/h) e com baixa taxa de transmissão de água. Camadas dificultam a passagem da água das camadas superiores às inferiores, com textura moderadamente fina.

Grupo D: Solos com alto potencial de escoamento, taxa de infiltração muito baixa quando completamente molhados (entre 0 e 1,27 mm/h) e taxa de transmissão de água muito baixa. Solos argilosos com alto potencial de expansão agindo como materiais impermeabilizantes próximos da superfície, solos com grande permanência do lençol freático e solos com argila dura ou camadas de argila próximas à superfície são pertencentes a este grupo.

Tabela 1: Classificação do tipo de solo conforme Sartori (2004).

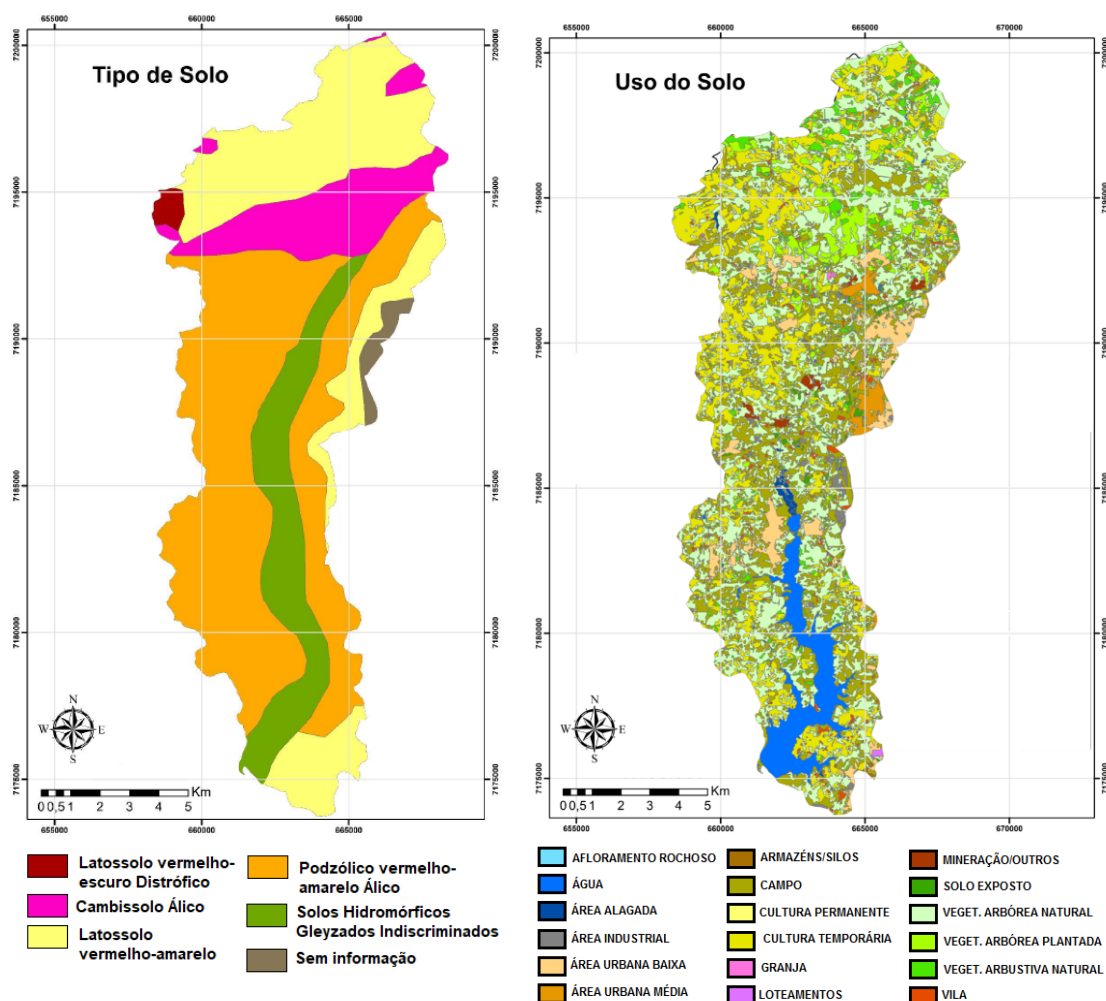
Grupo	Tipo de Solo
A	Areias Quartzosas (Aqa), Latossolo Roxo Álico (LRa1, LRa2, LRa3, LRa4, LRa5, LRa6), Latossolo Roxo Distrófico (LRd1, LRd2, LRd3, LRd4, LRd5, LRd6, LRd7, LRd8), Latossolo Roxo Eutrófico (LRe1, LRe2, LRe3)
B	Latossolo Bruno (LBa1, LBa2, LBa3, LBa4), Latossolo Vermelho-escuro Álico (LEa1, LEa2, LEa3, LEa4, LEa5, LEa6, LEa7, LEa8, LEa9, LEa10, LEa11, LEa12, LEa13, LEa14, LEa15, LEa16), Latossolo Vermelho-escuro Distrófico (LEd1, LEd2, LEd3, LEd4), Latossolo Vermelho-escuro Eutrófico (LEe1, LEe2), Latossolo Vermelho-amarelo (LVa1, LVa2, LVa3, LVa4, LVa5, LVa6, LVa7, LVa8, LVa9, LVa10, LVa11, LVa12, LVa13, LVa14), Terra Bruna Estruturada Álica (TBa1, TBa2), Terra Bruna Estruturada Distrófica (TBD1, TBD2), Terra Bruna Estruturada Eutrófica (TBe1, TBe2), Terra Bruna Estruturada Similar (TBSa1, TBSa2), Terra Rocha Estruturada Álica (TRa1, TRa2), Terra Rocha Estruturada Distrófica (TRd1, TRd2, TRd3, TRd4, TRd5), Terra Rocha Estruturada Eutrófica (TRE1, TRE2, TRE3, TRE4, TRE5, TRE6, TRE7, TRE8, TRE9)
C	Cambissolo Álico (Ca1, Ca2, Ca3, Ca4, Ca5, Ca6, Ca7, Ca8, Ca9, Ca10, Ca11, Ca12, Ca13, Ca14, Ca15, Ca16, Ca17, Ca18, Ca19, Ca20, Ca21, Ca22, Ca23, Ca24, Ca25, Ca26, Ca27, Ca28, Ca29, Ca30, Ca31, Ca32, Ca33, Ca34, Ca35, Ca36, Ca37, Ca38, Ca39), Cambissolo Distrófico (Cd1, Cd2), Cambissolo Eutrófico (Ce), Podzol (P)
D	Solos Aluviais Distróficos (Ad), Solos Aluviais Eutróficos (Ae), Afloramentos de Rochas (Aqa, AR!, AR2), Solos Hidromórficos Gleyzados Indiscriminados (HG1, HG2, HG3, HG4, HG5), Solos Orgânicos (HO, HOa1, HOa2), Podzólico Vermelho-amarelo Eutrófico (PE1, PE2, PE3, PE4, PE5), Podzólico Vermelho-amarelo Distrófico (PV1, PV2, PV3, PV4, PV5, PV6, PV7, PV8, PV9, PV10, PV11, PV12), Podzólico Vermelho-amarelo Álico (PVa1, PVa2, PVa3, PVa4, PVa5, PVa6, PVa7, PVa8, PVa9, PVa10, PVa11, PVa12, PVa13, PVa14, PVa15, PVa16, PVa17, PVa18, PVa19, PVa20, PVa21, PVa22, PVa23, PVa24, PVa25, PVa26, PVa27), Solos Litólicos Álicos (Ra1, Ra2, Ra3, Ra4, Ra5, Ra6, Ra7, Ra8, Ra9, Ra10, Ra11, Ra12, Ra13, Ra14, Ra15, Ra16, Ra17), Solos Litólicos Distróficos (Rd1, Rd2, Rd3, Rd4, Rd5, Rd6), Solos Litólicos Eutróficos (Re1, Re2, Re3, Re4, Re5, Re6, Re7, Re8, Re9, Re10, Re11, Re12, Re13), Solos Indiscriminados de Mangue (SM)

Tais grupamentos, ao serem interligados através de diversos estudos aos usos do solo, resultaram em tabelas do coeficiente de escoamento CN (aprofundado no item a seguir) apresentadas por USDA (1986). Sendo os usos do solo apresentados conforme uma classificação internacional, realizou-se uma reclassificação conforme os usos do solo encontrados na bacia do Passaúna, resultando-se na tabela 2 apresentada a seguir.

Tabela 2: Reclassificação do parâmetro CN.

Uso do Solo	A	B	C	D
AFLORAMENTO ROCHOSO	72	82	87	89
AGUA	100	100	100	100
AREA ALAGADA	100	100	100	100
AREA INDUSTRIAL	81	88	91	93
AREA URBANA ALTA	77	85	90	92
AREA URBANA BAIXA	54	70	80	85
AREA URBANA MEDIA	57	72	81	86
ARMAZENS/SILOS	56	75	86	91
ATERRO SANITARIO/INDUSTRIAL	49	69	79	84
CAMPO	45	66	77	83
CULTURA PERMANENTE	67	77	83	87
CULTURA TEMPORARIA	67	77	83	87
GRANJA	68	79	86	89
LIXAO	49	69	79	84
LOTEAMENTOS	39	61	74	80
MINERACAO/AREIA	68	79	86	89
MINERACAO/OUTROS	68	79	86	89
SOLO EXPOSTO	77	86	91	94
VEGETACAO ARBOREA NATURAL	26	52	62	69
VEGETACAO ARBOREA PLANTADA	46	68	78	84
VEGETACAO ARBUSTIVA NATURAL	25	55	70	77
VILA	51	68	79	84

Para a bacia do Passaúna, foram gerados os mapas indicados pelas figuras 3 e 4, que servem de entrada para o modelo apresentado para os parâmetros de tipo de solo e uso de solo:



Figuras 3 e 4: Mapas de Tipo de Solo e Uso do Solo na Bacia do Passaúna.

Por fim, os dados de concentração de poluentes também foram retirados da bibliografia internacional, conforme a tabela 3 apresenta as informações indicadas por Järveläinen (2014). Estes parâmetros foram, da mesma forma que o CN, correlacionados com a classificação do uso do solo brasileira disponível. A tabela 4 apresenta tal reclassificação utilizada para a estimativa do método proposto.

Tabela 3: Concentração de poluentes por uso do solo adaptado de JÄRVELÄINEN (2014).

MÉDIA	SST	NT	PT
	kg/ha/ano	kg/ha/ano	kg/ha/ano
1 Centro Urbano	1010	8,7	1,65
2 Estradas	265	2,1	0,335
3 Rodovias	1260	8,15	2,65
4 Industrial	825	7,15	1,4
5 Comercial/público	855	7,45	1,4
6 Residências unifamiliares	337,5	6,7	0,95
7 Residências multifamiliares	281,5	3,45	0,35
8 Agrícola	184	12	0,8
9 Vegetação	13	4,3	0,2

Tabela 4: Concentração de poluentes por uso do solo conforme reclassificação.

Uso do Solo	Concentração de Poluentes (kg/ha/ano)		
	TSS	P	N
AFLOREMENTO ROCHOSO	0	0	0
AGUA	0	0	0
AREA ALAGADA	0	0	0
AREA INDUSTRIAL	825	7,15	1,4
AREA URBANA ALTA	1010	8,7	1,65
AREA URBANA MEDIA	337,5	6,7	0,95
AREA URBANA BAIXA	281,5	3,45	0,35
ARMAZENS/SILOS	825	7,15	1,4
ATERRO SANITARIO/INDUSTRIAL	825	7,15	1,4
CAMPO	13	4,3	0,2
CULTURA PERMANENTE	184	12	0,8
CULTURA TEMPORARIA	184	12	0,8
GRANJA	825	7,15	1,4
LIXAO	825	7,15	1,4
LOTEAMENTOS	281,5	3,45	0,35
MINERACAO/AREIA	825	7,15	1,4
MINERACAO/OUTROS	825	7,15	1,4
SOLO EXPOSTO	13	4,3	0,2
VEGETACAO ARBOREA NATURAL	13	4,3	0,2
VEGETACAO ARBOREA PLANTADA	13	4,3	0,2
VEGETACAO ARBUSTIVA NATURAL	13	4,3	0,2
VILA	337,5	6,7	0,95

- **Mapas de risco e caminhos críticos de poluição**

Os mapas de risco e caminhos críticos de cada substância analisada são os resultados necessários para que se escolham as melhores BMP's a serem implementadas no manancial, com objetivo principal de ajudar no processo de potabilização da água pela Estação de Tratamento de Água (ETA) e diminuir seu custo de operação.

Os mapas de risco são baseados num conceito hidráulico e dinâmico do escoamento superficial: quanto maior a velocidade da água superficial, mais rápido ela chega ao corpo hídrico. Pela equação de Manning entende-se que a velocidade (V) é função da rugosidade do solo (n), das características dimensionais do micro ou macro canal por onde escoar (Rh) e da declividade do solo (I).

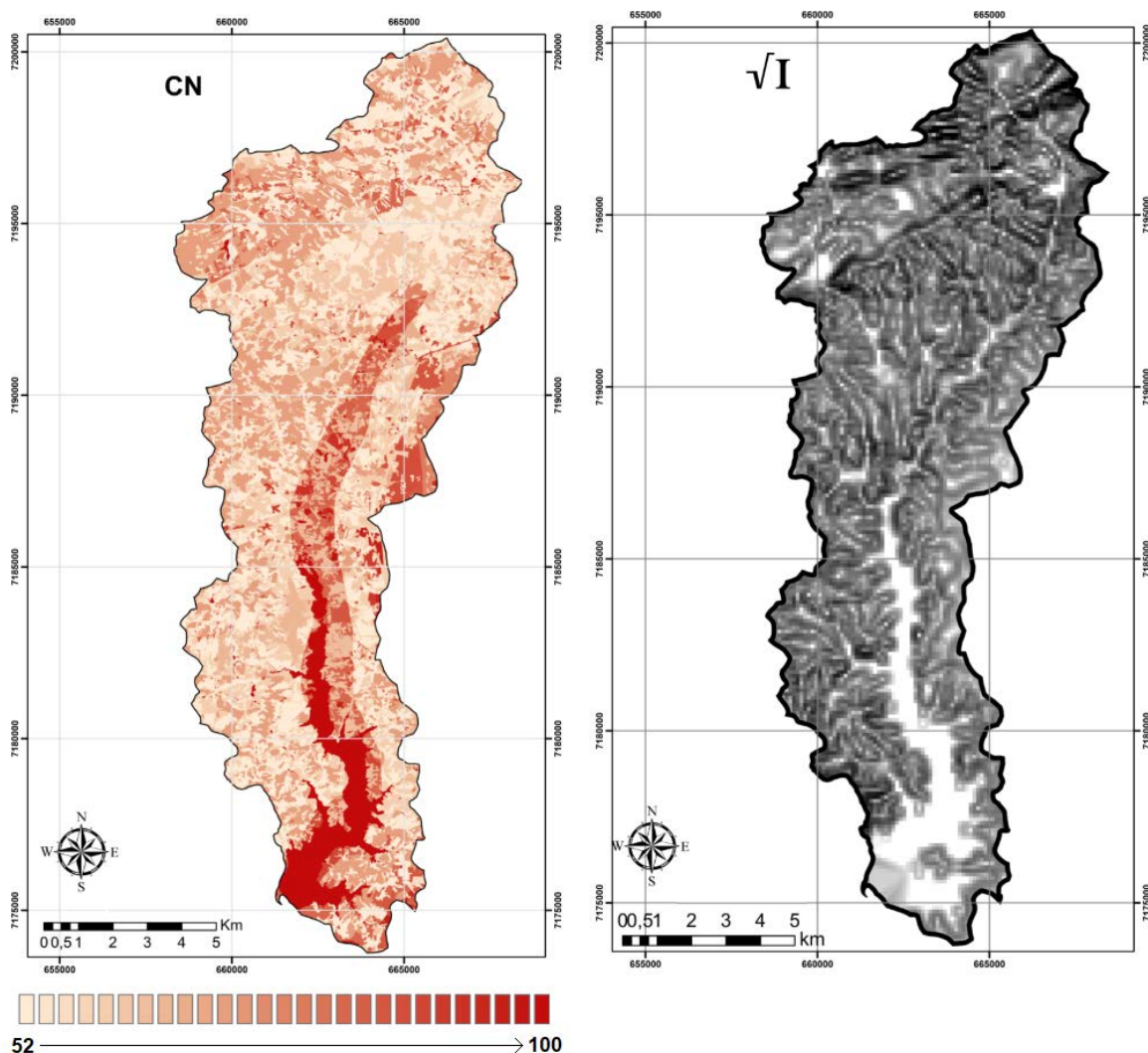
Admitindo-se, para este estudo, que o raio hidráulico (característica dimensional) não afeta significativamente o cálculo da velocidade pois se caracteriza por uma parte muito pequena do solo com variações irrelevantes, pode-se admitir que a velocidade do escoamento é diretamente proporcional à raiz quadrada da declividade e inversamente ao parâmetro de rugosidade do solo.

O parâmetro de rugosidade do solo pode ser entendido, de uma forma geral, como a capacidade da água escoar sobre uma superfície. Entretanto, este indicador é utilizado apenas para canais, não podendo ser adaptado para o escoamento disperso da água. A fim de que a influência do solo seja considerada, sugere-se a utilização do coeficiente de escoamento (CN) proposto por Tucci (2012) para entender a impermeabilidade do solo. Ainda que o coeficiente de Manning (n) e o coeficiente de escoamento (CN) sejam parâmetros distintos, para a profundidade de análise deste estudo podem ser considerados nativos de uma mesma avaliação, a do solo, uma vez que entendem o solo e sua relação o carregamento dos poluentes pela água escoante (item B3 da figura 1). O parâmetro CN entende como a água carregará os poluentes do solo, sabendo-se como se dará o escoamento

da água superficialmente. Portanto, para a obtenção de um mapa do risco de a poluição atingir o corpo hídrico com maiores concentrações, é sensato que o risco seja calculado pela equação 1 (item C da figura 1):

$$\text{Risco} = \text{Concentração do poluente} * \sqrt{I} * CN \quad \text{equação (1)}$$

Os dados da bacia do Passaúna utilizados como parâmetros de entrada estão apresentados nas figuras 5 e 6 a seguir:



Figuras 5 e 6: Mapas de CN e Raiz da Declividade na Bacia do Passaúna.

Cada análise de risco pode ser feita para uma unidade de área em um gradeamento quadriculado da bacia. Numericamente, o valor encontrado por essa análise não tem significado. É necessário que se tenha um padrão para fins de comparação deste número para que este tenha significado. Para tanto, entende-se o menor valor de risco encontrado para cada parâmetro como o menor risco possível, ou equivalente a 0, enquanto o maior valor será entendido como o maior risco possível, equivalente a 1. Adotando-se uma nova escala, portanto, tem-se um risco de 0 a 1 de que cada parâmetro esteja em uma concentração elevada no local em que se encontra.

Apenas essa análise, entretanto, não se faz suficiente, uma vez que as substâncias são transportadas pela água até chegarem aos canais e rios. O percurso que a água realiza acumula os riscos, oferecendo “caminhos” de maiores concentrações. Esses foram denominados caminhos críticos que, por sua vez, fornecem as informações imprescindíveis para que a análise de aplicabilidade de BMP’s seja realizada, uma vez que consideram o fator risco aliada às declividades do local. Será maior, nesses trajetos, a necessidade de se aplicar uma BMP e, complementarmente, o local de maior utilidade e eficiência na bacia. Com isso serão

gerados mapas de caminhos críticos de cada substância (item D da figura 1), que poderão ser sobrepostos de acordo com o parâmetro a qual a BMP é proposta.

- **Utilização do software gis**

A utilização de uma ferramenta que automatize os processos citados anteriormente permite a replicabilidade do método para qualquer bacia, seja manancial ou não, que possuam os dados básicos para seu funcionamento. Os procedimentos a serem realizados, sobretudo no software ArcGIS, procedem o indicado pela figura 7, onde estão ilustrados: os dados de entrada – nos círculos amarelos; as ferramentas de geoprocessamento do software a serem aplicadas – nos retângulos em preto; os dados de entrada inseridos a partir de dados intermediários, em cálculos e considerações fora do software – nos balões de comentários; os dados intermediários de saída em extensão .shp (shapefile) – nos círculos em azul; os dados intermediários de saída em raster ou tin – nos círculos em laranja e; os mapas resultantes principais – nos círculos em verde.

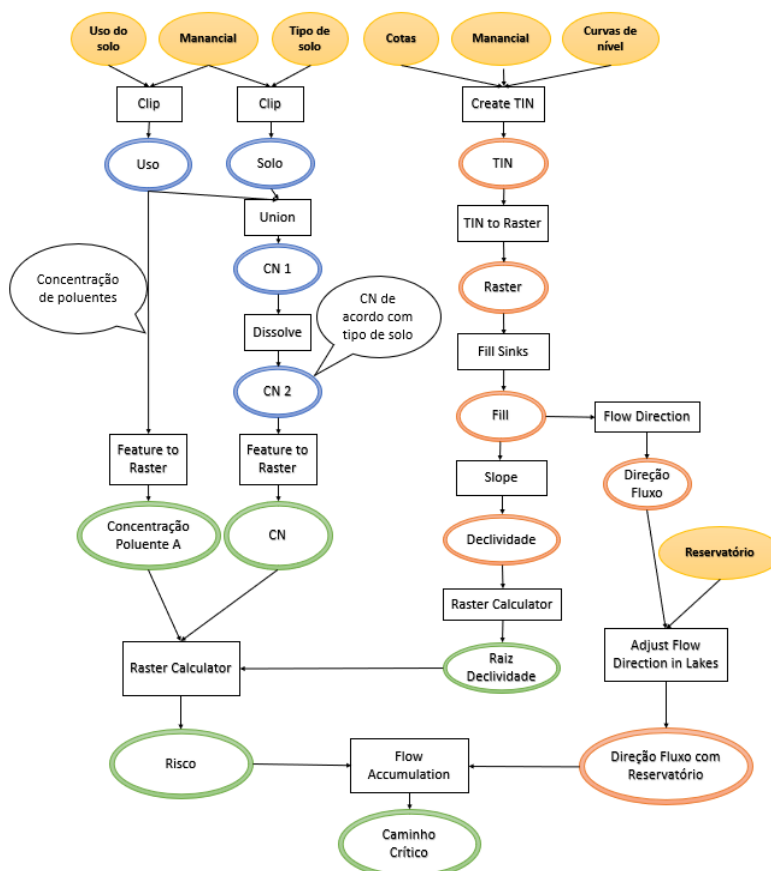


Figura 7: Fluxograma de processos em software GIS.

- **Aplicabilidade de BMP's**

As BMP's, traduzidas do inglês como "Melhores Práticas de Gerenciamento", prezam pelo combate à poluição das águas pluviais e incluem a prevenção e/ou redução da poluição difusa, reciclagem e tratamento desta poluição, atentando para a viabilidade de cada uma dessas medidas (EPA, 1993). Para a adoção de determinada prática, deve-se analisar os benefícios ambientais em conjunto com os investimentos econômicos, para então avaliar-se a viabilidade da aplicação da BMP. Além da melhoria na qualidade da água, as BMP's contribuem com outros fatores determinantes no gerenciamento de águas pluviais. A aplicação dessas medidas pode auxiliar na redução do volume de água e na diminuição dos picos de descarga, diminuindo a vazão do sistema. Para efeito de classificação, pode-se avaliar o nível de contribuição que a BMP agrega para cada um desses critérios. Contudo, destaca-se que apesar de as BMP's serem classificadas quanto à função, seja controle da poluição, de volume ou de fluxo, estes critérios são interdependentes.

São diversas as soluções de BMP's encontradas na literatura e, para que sejam aplicadas, o contexto em que se encontrarão deve ser definido e estudado. Isso quer dizer que para a aplicação e determinação desta prática, vários fatores devem ser analisados, tais como: aplicabilidade espacial (a área ocupada, a declividade do terreno necessária para sua eficiência, delimitações geográficas); condições hidrológicas; parâmetros da água nas quais influenciam; material e mão de obra disponível para sua aplicação e dimensionamento; custo.

A fim de que esses aspectos sejam levados em conta, uma análise inicial dos parâmetros da água em que cada uma destas soluções atua deve ser realizada. Considerando-se a gama de soluções, assim como mostrada na tabela 5 são apresentados 35 tipos de BMP's, extraídas de DEPP (2006) e classificadas conforme alguns critérios. A partir destas informações pode-se iniciar o processo de seleção da prática mais adequada para implementação conforme as características específicas da situação abordada (item E), realizando-se uma primeira triagem de acordo com os parâmetros principais.

Em seguida, a aplicabilidade espacial deste conjunto de soluções pode ser desenvolvida e apreciada para cada área selecionada. As áreas selecionadas devem abordar as maiores concentrações de poluentes e por quais caminhos estas seguirão, localizando os locais de maior necessidade de aplicação de uma BMP, compreendendo-se o local onde ela pode ser realmente aplicável (item F), considerando critérios limitantes de dimensionamento e execução. Por fim, serão escolhidas BMP's para a análise aprofundada da solução. O dimensionamento (item G) e estimativa de custo da aplicação de cada uma (item H) levará a soluções práticas e reais para a diminuição da poluição difusa, oferecendo um melhoramento da qualidade da água em uma bacia de manancial.

Tabela 5: Classificação das BMP's.

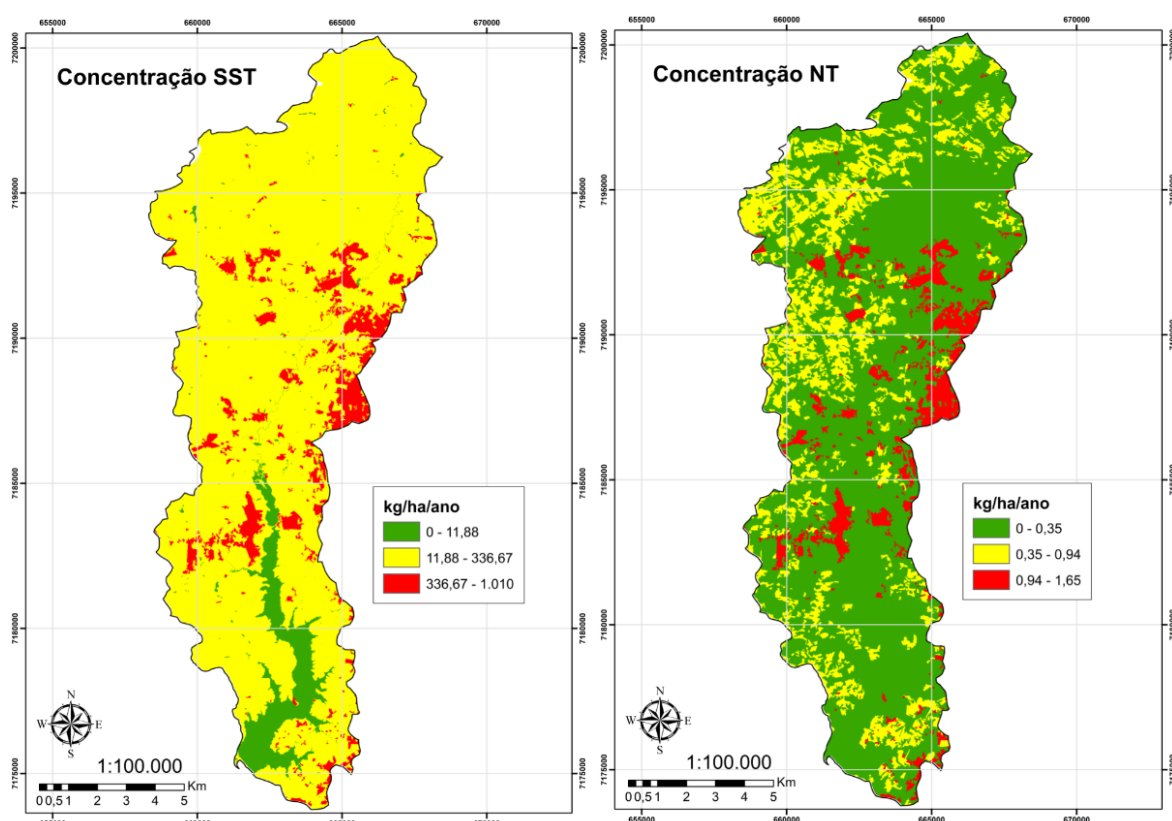
		Legenda:													N° Previsão			
															0-20%			0
															20-40%			2
															40-60%			3
															60-80%			4
															80-100%			5
					Muito Alto				5	LIMITADO		3	Previsão		6			
BMP		PRÁTICA	ESCALA	TIPO	CRITÉRIO				APLICABILIDADE						EFICIÊNCIA			
					Redução de Volume		Recarga	Controle de Taxa de Pico	Qualidade da Água	Residencial	Comercial	Ultra Urbano	Rural / Agrícola	Industrial	Rodovias	TSS	TP	NO3
1	Proteção de recursos sensíveis e de valor especial	Não-Estrutural	Bacia	Zonal	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1	6	6	6	
2	Proteção, Conservação e Aprimoramento de Áreas Ribeirinhas	Não-Estrutural	Bacia	Zonal	3	3	2	5	1	1	1	1	1	1	6	6	6	
3	Utilização de caminhos de fluxo natural no planejamento de águas pluviais	Não-Estrutural	Bacia	Linear	2	2	4	3	1	1	2	3	1	1	2	1	0	
4	Eliminação de fontes de poluição pontuais	Não-Estrutural	Bacia	Zonal	2	2	2	5	1	1	1	3	1	2	6	6	6	
5	Construções coletivas - Construir na menor área possível	Não-Estrutural	Lote	Zonal	5	5	5	5	1	1	3	1	3	2	6	6	6	
6	Gerenciamento do uso do solo	Não-Estrutural	Bacia	Zonal	5	5	5	5	1	1	1	1	1	3	6	6	6	
7	Minimização de áreas antropizadas	Não-Estrutural	Bacia	Zonal	4	4	4	4	1	1	3	2	1	3	3	0	0	
8	Desconexão dos telhados	Não-Estrutural	Bacia	Zonal	4	4	4	2	1	1	3	2	3	3	2	0	0	
9	Desconexão do sistema de drenagem	Não-Estrutural	Bacia	Linear	4	4	4	2	1	1	3	2	3	3	2	0	0	
10	Limpeza da rua	Não-Estrutural	Bairro	Zonal	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	5	5	3	
11	Minimização da compactação do solo	Não-Estrutural	Bacia	Zonal	5	5	4	5	1	1	1	2	1	1	2	0	0	
12	Redução da impermeabilidade do solo	Não-Estrutural	Bacia	Zonal	5	5	5	3	1	1	3	1	1	3	6	6	6	
13	Reflorestamento	Não-Estrutural	Bacia	Zonal	2	2	2	5	1	1	3	1	1	3	5	5	3	
14	Pântano Construído	Estrutural	Bairro	Pontual	2	2	4	4	1	1	3	1	1	1	5	5	2	
15	Bacia de Infiltração	Estrutural	Bairro	Pontual	4	4	3	4	1	1	3	1	1	3	5	5	2	
16	Biorretenção	Estrutural	Lote	Pontual	3	4	2	4	1	1	1	1	1	1	5	5	2	
17	Lagoa Úmida	Estrutural	Bairro	Pontual	2	2	4	3	1	1	1	1	1	1	4	3	2	
18	Lagoa Seca	Estrutural	Bairro	Pontual	2	1	4	2	1	1	1	1	1	1	3	2	1	
19	Valas Vegetadas	Estrutural	Bairro	Linear	3	3	4	4	1	1	3	1	1	1	3	3	1	
20	Vala de Infiltração	Estrutural	Bairro	Linear	3	4	3	4	1	1	1	1	1	1	5	5	2	
21	Faixa Filtrante Vegetada	Estrutural	Bairro	Linear	3	3	2	4	1	1	3	1	3	1	2	1	1	
22	Acostamento de infiltração	Estrutural	Bacia	Linear	3	2	3	4	1	1	3	1	1	1	3	3	2	
23	Telhado Verde	Estrutural	Lote	Zonal	4	1	2	3	1	1	1	1	1	2	5	5	2	
24	Pavimento Permeável com cama de infiltração	Estrutural	Lote	Zonal	3	3	3	3	3	1	1	1	1	3	5	5	2	
25	Cama de infiltração subterrânea	Estrutural	Lote	Zonal	4	4	3	4	1	1	1	1	1	3	5	5	2	
26	Poço de escoamento	Estrutural	Lote	Pontual	3	4	3	3	1	1	1	1	3	2	5	5	2	
27	Filtro construído	Estrutural	Bairro	Pontual	3	3	3	4	3	1	1	1	1	1	5	5	2	
28	Captação e reúso de escoamento	Estrutural	Lote	Pontual	4	2	2	3	1	1	1	1	1	3	5	5	5	
29	Filtros de qualidade da água e dispositivos hidrodinâmicos	Estrutural	Bairro	Pontual	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	3	3	1	
30	Restauração de reserva ribeirinha	Estrutural	Bacia	Zonal	3	3	2	4	1	1	1	1	1	3	4	3	3	
31	Restauração paisagística	Estrutural	Bacia	Zonal	3	3	3	5	1	1	3	1	1	1	5	5	3	
32	Restauração e alteração do solo	Estrutural	Bacia	Zonal	2	2	3	3	1	1	1	1	1	1	5	5	3	
33	Restauração de planícies aluviais	Estrutural	Bacia	Zonal	3	3	3	4	1	1	1	1	1	1	5	5	2	
34	Espalhador de nível	Estrutural	Lote	Pontual	2	2	2	2	1	1	3	2	1	1	1	1	1	
35	Áreas de detenção especial - estacionamentos, telhados	Estrutural	Lote	Pontual	2	2	3	2	3	1	1	2	1	3	0	0	0	

RESULTADOS E DISCUSSÃO

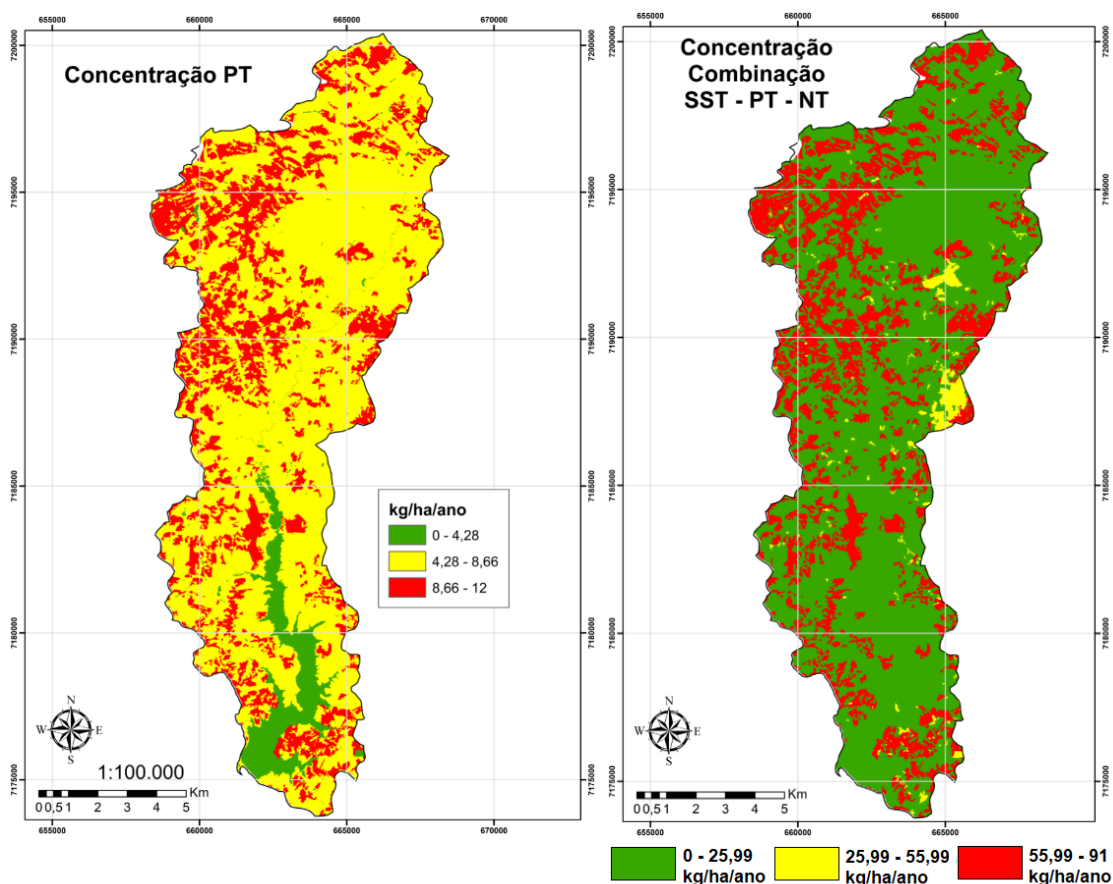
As concentrações de Sólidos Suspensos Totais (SST), Fósforo Total (PT) e Nitrogênio Total (NT) foram retiradas da bibliografia em relação ao uso do solo e classificadas nos níveis verde (baixo), amarelo (médio) e vermelho (alto), de forma a facilitar o entendimento de proporcionalidade neste estudo. As áreas de alta concentração de poluentes são de extrema importância para a análise de possível local de implantação de BMP, uma vez que indicam os locais que são fonte dos poluentes.

Nas figuras 8, 9 e 10 são apresentados os mapas de concentração de cada poluente na bacia. As informações dos mapas dos três compostos geraram o mapa de combinação, apresentado na figura 11, em que, para cada quadrícula do raster, a concentração média de poluentes foi encontrada pela seguinte equação 2:

$$C_{\text{combinação}} = 100 * \frac{\left[\frac{C_{\text{SST}}}{C_{\text{máx SST}}} + \frac{C_{\text{PT}}}{C_{\text{máx PT}}} + \frac{C_{\text{NT}}}{C_{\text{máx NT}}} \right]}{3} \quad \text{equação (2)}$$



Figuras 8 e 9: Mapas de Concentração de SST e NT na Bacia do Passaúna.



Figuras 10 e 11: Mapas de Concentração de PT e da Combinação dos Poluentes na Bacia do Passaúna.

Onde,

$C_{\text{combinação}}$ é a concentração da combinação, em uma escala de 0 a 100;

C_{SST} , C_{PT} e C_{NT} são as concentrações de cada poluente e;

$C_{\text{máx SST}}$, $C_{\text{máx PT}}$ e $C_{\text{máx NT}}$ referem-se ao valor máximo de concentração de cada poluente;

A síntese das áreas destacadas nos mapas é apresentada na tabela 06:

Tabela 6: Síntese das áreas destacadas nos mapas de concentração de poluentes.

Síntese das áreas destacadas nos mapas de concentração de					
Indicativo	Grau	Faixa de Valor	Escala 0 - 1	Área (km²)	Área (%)
Concentração SST		0 - 11,88	0 - 0,0118	9,3	6%
		11,88 - 336,67	0,0118 - 0,3333	129,5	86%
		336,67 - 1010	0,3333 - 1	12,1	8%
Concentração PT		0 - 4,28	0 - 0,3567	9,4	6%
		4,28 - 8,66	0,3567 - 0,7217	104,4	69%
		8,66 - 12	0,7217 - 1	37,1	25%
Concentração NT		0 - 0,35	0 - 0,2121	108,3	72%
		0,35 - 0,94	0,2121 - 0,5697	30,6	20%
		0,94 - 1,65	0,5697 - 1	12,1	8%
Concentração Combinação SST - PT - NT		0 - 0,26	0 - 0,2857	108,3	72%
		0,26 - 0,56	0,2857 - 0,6154	3,6	2%
		0,56 - 0,91	0,6154 - 1	39,1	26%

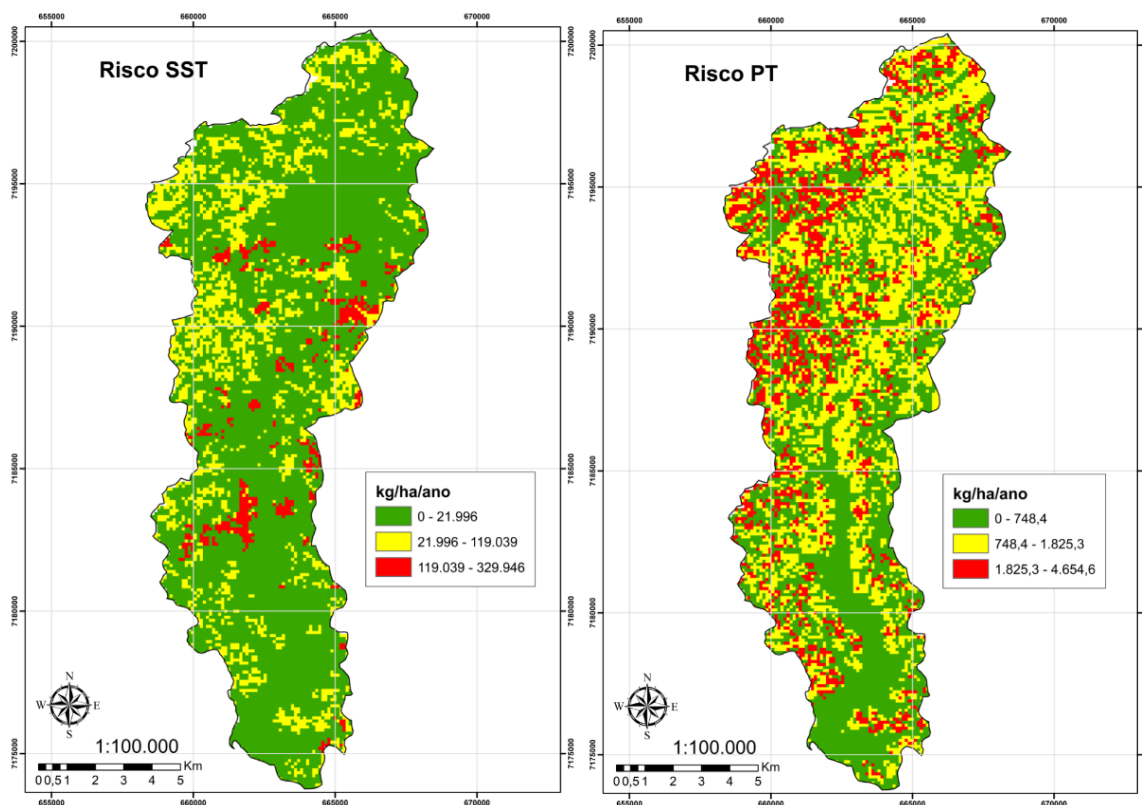
Os mapas de risco de poluentes, apresentados nas figuras 12, 13, 14 e 15, consideram as três variáveis mapeadas: CN, declividade e concentração. Quanto maior o valor de qualquer um destes parâmetros, maior será o risco de poluição difusa que aquela área apresenta. O mapa de risco demonstra, da mesma maneira que os mapas de concentração, possíveis locais de implementação de BMP's. A combinação de poluentes apresenta altos riscos em locais cercados por áreas de médio risco também. Isso significa que, dependendo de

onde as medidas estruturais forem implantadas, estas poderão conter os poluentes provindos de áreas de alto e também de médio risco, confirmando a necessidade da utilização da medida estrutural.

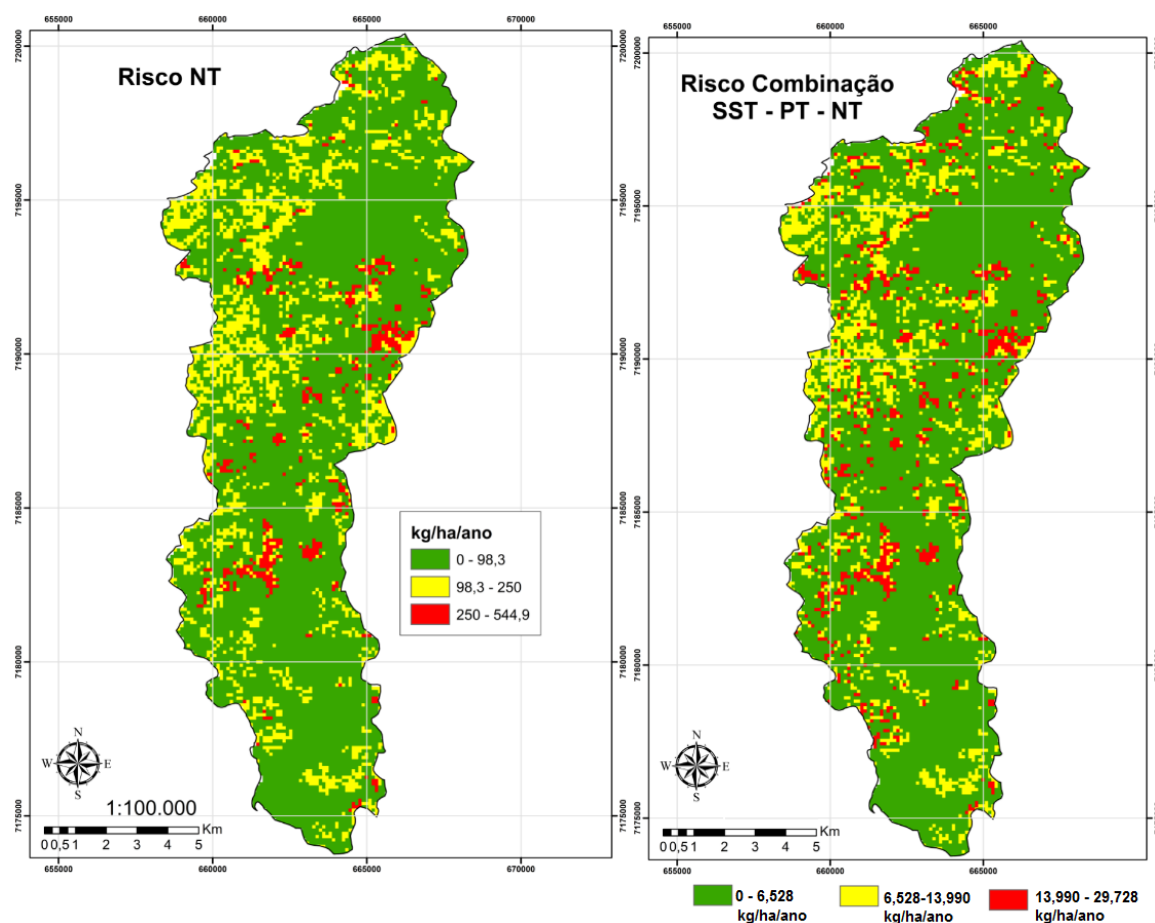
A tabela 7 apresenta o resumo dos mapas apresentados, indicando a quantidade de área para cada nível de risco e poluentes, de forma que se escolham locais de intervenção do escoamento destes poluentes conscientemente.

Tabela 7: Síntese das áreas destacadas nos mapas de risco.

Indicativo	Grau	Faixa de Valor	Escala 0 - 1	Área (km ²)	Área (%)
Risco SST		0 - 21.996	0 - 0,0667	112,7	75%
		21.996 - 119.039	0,0667 - 0,3608	30,6	20%
		119.039 - 329.946	0,3608 - 1	6,4	4%
Risco PT		0 - 748,39	0 - 0,1608	70,1	47%
		748,39 - 1825,34	0,1608 - 0,3922	54,3	36%
		1825,34 - 4654,61	0,3922 - 1	25,3	17%
Risco NT		0 - 98,29	0 - 0,1804	113,7	76%
		98,29 - 250,01	0,1804 - 0,4589	29,8	20%
		250,01 - 544,89	0,4589 - 1	6,2	4%
Risco Combinação SST - PT - NT		0 - 65,28	0 - 0,2196	113,8	76%
		65,28 - 139,90	0,2196 - 0,4706	25,5	17%
		139,90 - 297,28	0,4706 - 1	10,4	7%



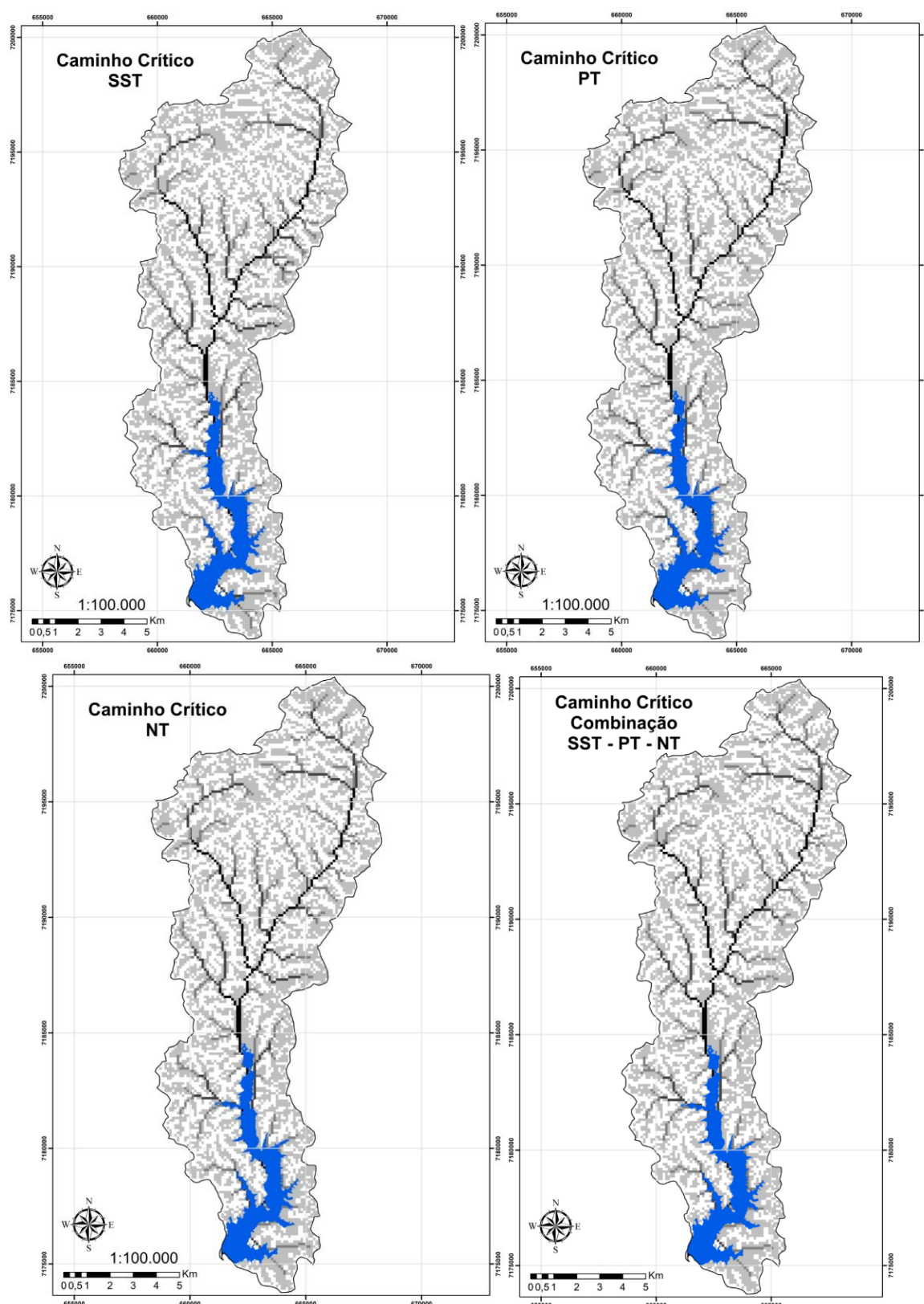
Figuras 12 e 13: Mapas de Risco para SST e PT na Bacia do Passaúna.



Figuras 14 e 15: Mapas de Risco para NT e para Combinação dos Poluentes na Bacia do Passaúna.

Os mapas de caminhos críticos representam os poluentes em movimento, de acordo com o fluxo mais provável. Este fluxo depende da declividade do terreno, uma vez que a água tende a seguir os locais de cota mais baixa, por ser transportada por gravidade. Para os mapas apresentados nas figuras 16, 17, 18 e 19, o risco é o fator de peso em cada quadrícula do *raster*. Isso significa que cada quadrícula do mapa representa o somatório de riscos de cada quadrícula provável de ter seu fluxo direcionado até aquele local.

Os mapas apresentam uma escala de cor, em que as cores mais escuras representam a maior concentração de poluentes. Inicialmente, percebe-se que os caminhos mais críticos são aqueles que coincidem com os corpos d'água, onde realmente ocorre a acumulação dos poluentes que caminham até o exutório da bacia. Além destes caminhos mais evidentes, entretanto, estão presentes trajetos sobre a terra, que configuram os caminhos mais prováveis de poluição difusa. Estes caminhos são, portanto, locais de maior eficiência de BMP's, pois alertam sobre as probabilidades mais altas de qualquer poluente passar concentradamente pelo local.



Figuras 16, 17, 18 e 19: Mapas de Caminhos Críticos para SST, NT, PT e para a combinação dos poluentes na Bacia do Passaúna.

A aplicação do método proposto resultou em diversos mapas, conforme apresentado anteriormente. Os mapas de concentração de poluentes apresentaram as diferentes utilizações do solo como potenciais áreas poluidoras,

indicando possíveis locais que merecem atenção quanto ao gerenciamento do uso do solo, reforçando a importância de valorizar as medidas em escala micro em oposição às análises de ampla dimensão, que consideram apenas a qualidade do solo no exutório das bacias.

Para os mapas de risco, pôde-se observar que os altos riscos observados se deram, em sua maioria, onde também havia grande concentração de poluentes. Entretanto, nem todas as áreas de alta concentração de poluentes indicaram potencial risco. Isso pode significar que a região terá elevada taxa de infiltração do volume precipitado, diminuindo a quantidade e a velocidade com que os poluentes atingirão o corpo hídrico. Outra hipótese possível é a de que esta velocidade será pequena por conta da reduzida declividade do terreno. Por conta de tais hipóteses, faz-se necessária a análise conjunta dos mapas de risco com aqueles que o geraram: concentração de poluente, declividade e CN.

Já para os mapas de caminho crítico, estes indicaram, como esperado, que as maiores concentrações se darão no corpo hídrico. Além disso, pôde-se observar os potenciais trajetos a serem percorridos pelos poluentes, apesar de sua precisão não ser adequada o suficiente para perfeita determinação do caminho real e prático do escoamento superficial. Ainda assim, os mapas de caminho crítico servem como indicadores para compreender os possíveis locais de aplicação das medidas de gerenciamento de águas pluviais.

Na escolha do potencial local de aplicação da BMP, prezou-se por analisar áreas mais críticas quanto à poluição, ou seja, aquelas com maior concentração de poluentes e maior risco. Aquelas indicadas através de círculos verdes na figura 20 apresentam algumas dessas principais regiões. A partir de tais informações, optou-se pela área indicada na imagem, que indicava claramente o fluxo provável das chuvas pelo mapa de caminho crítico, além de estar próxima ao reservatório, ter declividade adequada para a implementação de determinadas BMP's e área suficiente para tal.

A partir da escolha da área de implementação da BMP, prosseguiu-se para a definição de qual alternativa utilizar. Para isso, fez-se uso da tabela 5, filtrando as características das colunas de forma a abranger a área escolhida e os padrões desejados. Os filtros aplicados foram:

- Prática: Estrutural – Devido aos objetivos do trabalho incluem o dimensionamento de uma BMP;
- Escala: Bairro – Escala mais adequada em relação à área escolhida;
- Aplicabilidade – Rural/Agrícola: Sim – Visto que a área determinada é, em sua maioria agrícola;
- Eficiência – SST: 80 – 100% - Devido à ainda grande variedade de BMP's aplicáveis, optou-se por selecionar aquelas com maior eficiência.

Após isso, constatou-se que as BMP's admissíveis para o local desejado são aquelas mostradas na tabela 8.

Tabela 8: BMP's aplicáveis na área escolhida.

Tabela 6: BMP's aplicáveis na área escolhida.																
BMP	PRÁTICA	ESCALA	TIPO	CRITÉRIO				APLICABILIDADE						EFICIÊNCIA		
				Redução de Volume	Recarga	Controle de Taxa de Pico	Qualidade da Água	Residencial	Comercial	Ultra Urbano	Rural / Agrícola	Industrial	Rodovias	TSS	TP	NO3
Pântano Construído	Estrutural	Bairro	Pontual	2	2	4	4	1	1	3	1	1	1	5	5	2
Bacia de Infiltração	Estrutural	Bairro	Pontual	4	4	3	4	1	1	3	1	1	3	5	5	2
Vala de Infiltração	Estrutural	Bairro	Linear	3	4	3	4	1	1	1	1	1	1	5	5	2
Filtro construído	Estrutural	Bairro	Pontual	3	3	3	4	3	1	1	1	1	1	5	5	2

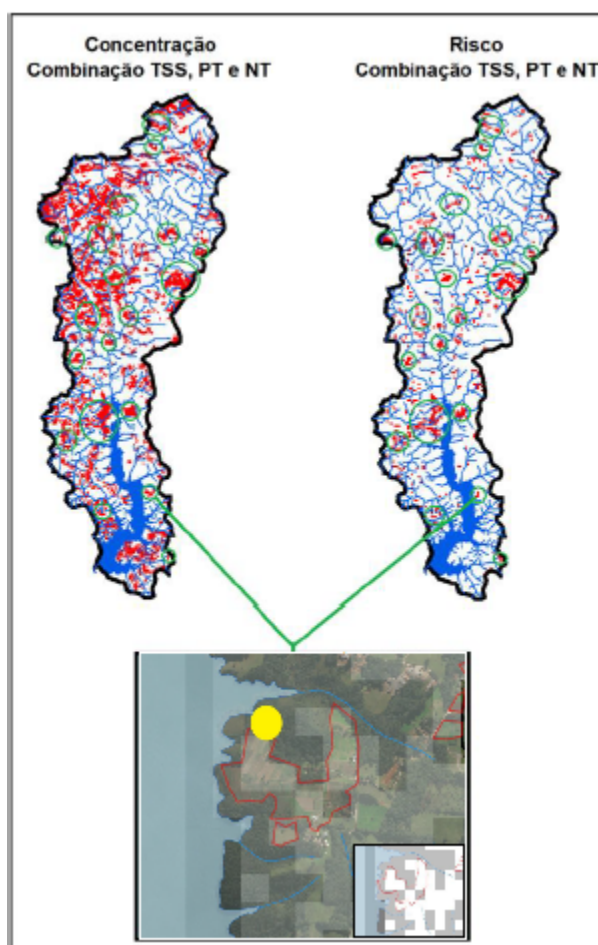


Figura 20: Escolha da área de implementação de BMP's.

Em posse do resultado obtido, buscaram-se mais informações sobre cada uma das BMP's, inclusive sobre o dimensionamento e optou-se por selecionar a Bacia de Infiltração, iniciando-se então o processo de dimensionamento e projeto da medida escolhida.

Como primeiro passo, consultou-se a APA do Passaúna para determinação dos locais permitidos para se construir e observou-se que, na área escolhida, estão instituídas a Zona de Proteção de Represa (ZPRE) e Zona de Ocupação Orientada (ZOO). Dessa forma, constatou-se que não se pode construir na ZPRE que, segundo o Decreto nº 5063/2001 (PARANÁ, 2001), “compreende uma faixa de 100 m ao longo do reservatório do Passaúna, contada a partir de cota 888,80 m”. Portanto, traçou-se a delimitação da ZPRE e escolheu-se na ZOO o ponto mais adequado para construção da BMP com o auxílio dos mapas de concentração de poluentes, riscos e caminhos críticos apresentados.

Posteriormente, com o objetivo de ampliar a área de contribuição, decidiu-se adotar o uso de valas para condução de águas pluviais até a bacia de infiltração. A partir dos resultados obtidos até agora, pôde-se iniciar o dimensionamento da Bacia de Infiltração, conforme MSM (2018). Para isso, serão apresentados os parâmetros necessários para os cálculos, sendo que, como as referências são estrangeiras, alguns dos cálculos foram feitos em unidades próprias da região de onde se elaborou o manual e, na sequência, convertidos para as unidades brasileiras.

- Área de superfície impermeável da área de contribuição (A_c): com auxílio de software GIS, obtiveram-se os usos do solo e suas respectivas áreas dentro da bacia e, conforme Tomaz (2008), relacionou-se cada uso do solo com sua impermeabilidade, encontrando a área total impermeável (tabela 9).

Tabela 9: Área de superfície impermeável da bacia de contribuição.

Área impermeável de contribuição		
USO DO SOLO	ÁREA (m ²)	IMPERMEABILIDADE (%)
ÁGUA	91,21	100%
CAMPO	13105,17	9%
CULTURA TEMPORÁRIA	38941,45	2%
VEGETAÇÃO ARBÓREA NATURAL	26324,34	2%
ÁREA IMPERMEÁVEL TOTAL (m²)		2576
ÁREA IMPERMEÁVEL TOTAL (ft²)		27728

• Taxa de infiltração do solo (IR): variável dependendo da classe do solo. Para o caso estudado, o solo é da classe D e sua taxa de infiltração é 0,15cm/h (MSM, 2018).

• Tempo de máximo de rebaixamento da água na bacia de infiltração (DDT_{calc}): 48 horas, segundo MSM (2018).

Portanto, pôde-se proceder para os cálculos conforme a seguir:

$$D = IR * DDT_{calc} = 0,15 \text{ cm/h} * 48h = 7,2 \text{ cm} = 0,072 \text{ m} \quad (\text{equação 3})$$

$$V_w = 0,0833 * A_c = 0,0833 * 27728 \text{ ft}^2 = 2309,72 \text{ ft}^3 = 65,40 \text{ m}^3 \quad (\text{equação 4})$$

$$A_s = V_w / D = 65,40 \text{ m}^3 / 0,072 \text{ m} = 908,38 \text{ m}^2 \quad (\text{equação 5})$$

Onde,

V_w = volume de tratamento de água;

A_s = Área da bacia de infiltração.

Em adição a isso, a maioria das BMP's, assim como a bacia de infiltração, exige uma medida de pré-tratamento que, na maioria dos casos, consiste em outra BMP. Para o presente estudo optou-se pelas Valas Vegetadas, aproveitando o fato de que já há a necessidade da construção de valas para a condução das águas pluviais até a bacia de infiltração. Sendo assim, as valas serão utilizadas de maneira sustentável cumprindo com duas funções.

A determinação da vazão que deve ser escoada por cada uma das valas (uma de cada lado da bacia de infiltração) foi feita utilizando o Método Racional, sendo que o coeficiente de escoamento superficial (C) adotado foi o de 0,125, conforme recomendado por Wilken (1978) para partes rurais e áreas verdes, e a intensidade máxima da chuva (i) foi calculada pela Equação de Curitiba – Prado Velho (1989) retirada de Fendrich (2011), conforme a seguir:

$$i = \frac{3.221,07 * T_r^{0,258}}{(t+26)^{1,01}} \quad (\text{equação 6})$$

Para o Tempo de Recorrência (Tr) utilizou-se o valor de 2 anos, conforme recomendado por DEPNI (2016), visto que o efeito causado por uma extrapolação de vazão não será altamente prejudicial. Já para o Tempo de Duração (t) da chuva, recomenda-se que o valor seja igual ao maior ao tempo de concentração da bacia. Dessa forma, calculou-se o tempo de concentração do corpo hídrico mais próximo, pela equação de Ven Te Chow, recomendada para bacias rurais e menores de 25 km², resultando no valor de 17 minutos. Esse valor foi arredondado para o próximo inteiro múltiplo de 5, conforme recomendações da bibliografia. Sendo assim, encontrou-se o valor de 80,59 mm/h para a intensidade máxima da chuva.

Para o dimensionamento da vala, seguiu-se o recomendado por DEPNI (2016) e adotou-se a largura da base como sendo igual a três metros, a declividade lateral de 1:3 e a profundidade máxima do escoamento superficial como sendo igual a 10 centímetros. Dessa forma, os valores encontrados para a área da seção transversal (A), perímetro molhado e raio hidráulico (Rh) foram de 0,33 m², 3,63 m e 0,091 m respectivamente. O coeficiente de Manning considerado foi o de 0,25, conforme recomendado por DEPNI (2016) e a declividade foi calculada tendo em vista a extensão da vala e sua diferença de cota, pelas curvas de nível. Com base nisso, pode-se calcular, pela equação de Manning, a vazão suportada por cada uma das valas.

Dessa forma, para a vala ao norte da bacia de infiltração, a vazão a ser escoada é de 0,086 m³/s, enquanto a vazão suportada pela vala é de 0,089 m³/s. Já para a vala ao sul da bacia de infiltração, os valores são de, respectivamente, 0,134 m³/s e 0,089 m³/s.

Pôde-se perceber que para a vala ao sul da bacia de infiltração a vazão escoada pela vala não suporta o escoamento da área de contribuição. Sendo assim, optou-se por fazer a utilização de duas valas associadas, com a divisão do fluxo entre elas. Apesar de a profundidade dimensionada para a bacia de infiltração ser de 7,2 cm e das valas ser de 10 cm, recomenda-se um bordo-livre de pelo menos 30 centímetros. Portanto, para o projeto foi considerada a profundidade de 50 cm tanto para a bacia de infiltração como para as valas vegetadas. O projeto, em esboço, está apresentado a seguir nas figuras 21, 22, 23 e 24.

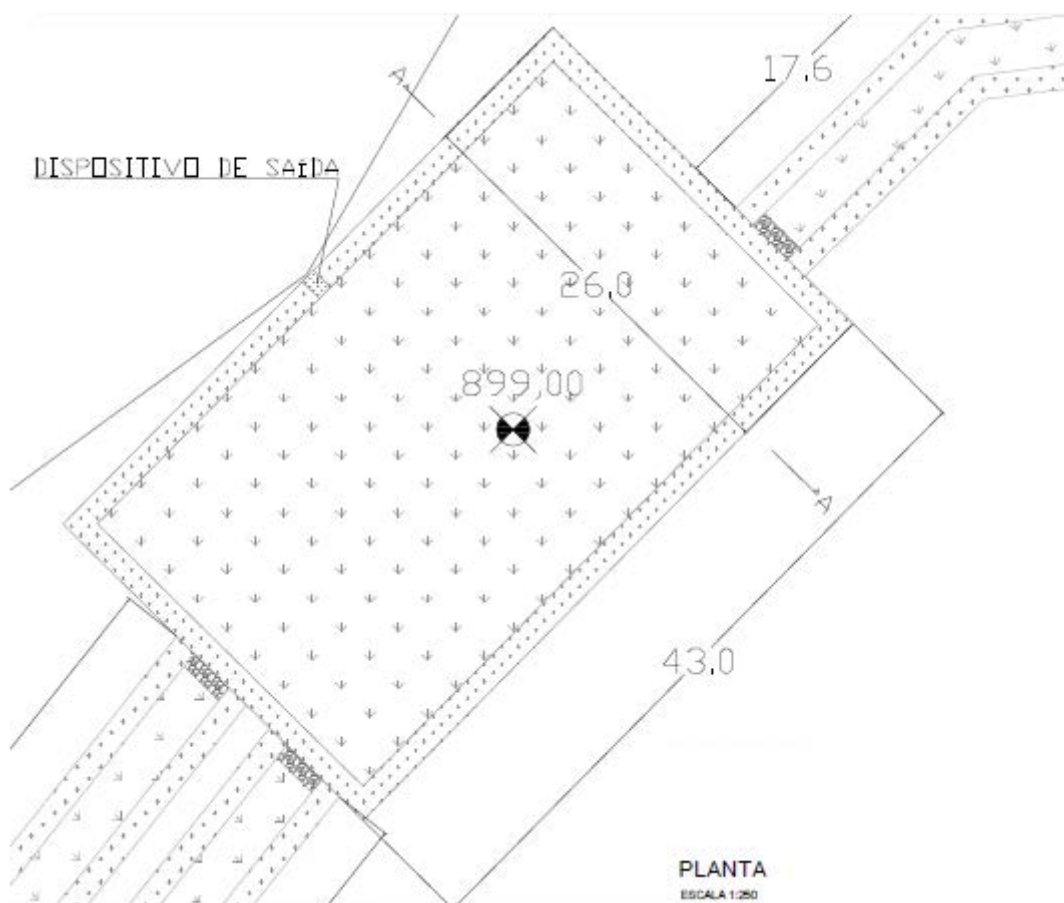


Figura 21: Planta da Bacia de Infiltração.

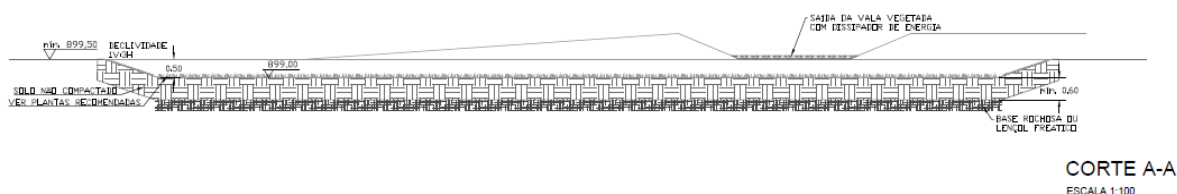


Figura 22: Corte da Bacia de Infiltração.

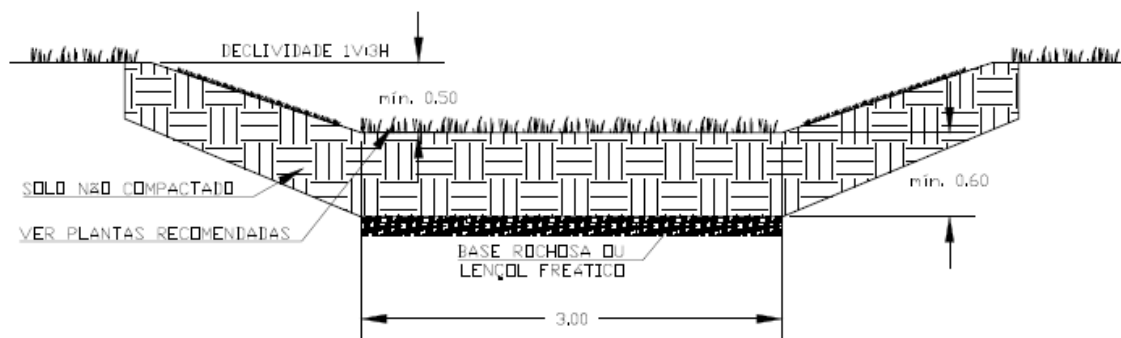


Figura 23: Corte da Vala Vegetada.

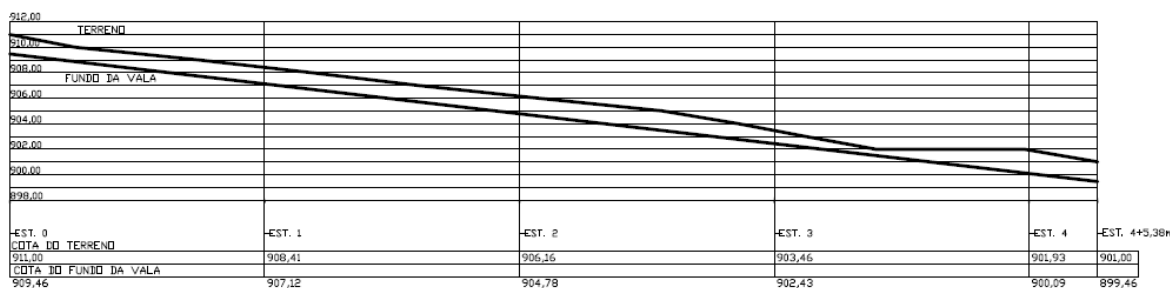


Figura 24: Perfil da Vala Vegetada A.

A viabilidade da execução da obra amparou-se nas ferramentas e resultados obtidos anteriormente, reforçando a importância do adequado gerenciamento dos recursos hídricos. Em adição a isso, para que a obra cumpra com seu objetivo é imprescindível o cumprimento das recomendações de projeto, construção e manutenção, presentes nos manuais de gerenciamento de águas pluviais.

Conforme apresentado anteriormente, a eficiência da bacia de infiltração quanto à remoção de SST, PT e NT é, respectivamente, 85%, 85% e 30%. Já para a vala vegetada, a eficiência para a remoção dos mesmos poluentes é de 50%, 50% e 20%. Porém, como a profundidade de escoamento superficial da vala foi de 10 cm e não de 5 cm como o recomendado, a eficiência da BMP deve ser calculada da seguinte forma:

$$ESST = (L_{total} - L_{0\%}) * 50\% / L_{total} \quad \text{equação (7)}$$

Onde,

ESST: eficiência quanto à remoção de SST;

L_{total} : comprimento total da vala;

$L_{0\%}$: distância do ponto onde a profundidade do escoamento ultrapassa os 5 cm até o fim da vala.

Para determinação de $L_{0\%}$, utilizou-se da equação de Manning para a profundidade de escoamento igual a 5 cm, encontrando a vazão escoada pela vala e, a partir do método racional, pôde-se encontrar a área de contribuição que leva a este valor do escoamento e então, encontrou-se o valor do comprimento onde a profundidade de escoamento extrapola o valor recomendado. Portanto, para cada uma das três valas (uma ao norte da bacia de infiltração e duas ao sul) encontrou-se o valor de ESST igual a 16,4%, 8,9% e 25%. Para determinação da ESST final da vala vegetada fez-se uma média ponderada com os valores do comprimento de cada vala, encontrando-se o valor de 15,8%. Por uma relação simples de equivalência, encontrou-se a eficiência de remoção de 15,8% para PT e 6,3% para NT.

Sendo assim, pode-se calcular a eficiência total do sistema de BMP's em séries aplicado por meio da equação:

$$R=1-\Pi (1-r_i)$$

equação (8)

Onde,

R: eficiência total de remoção das BMP's em séries;

r_i: eficiência de remoção individual da BMP.

Com a aplicação da fórmula acima, chegou-se aos valores de remoção de SST, PT e NT de, respectivamente 87,4%, 87,4% e 34,4%, resultando em valores satisfatórios para o estudo em questão. Para que se atinja o objetivo de melhorar a qualidade da água do manancial, é necessária a análise de toda a bacia, por meio da aplicação do método aqui proposto, incluindo a identificação das áreas críticas, potenciais locais de aplicação das medidas e aplicação das práticas de gerenciamento, incluindo as não-estruturais, que envolvem procedimentos adotados e limitações quanto ao uso do solo, auxiliando principalmente na remoção de poluentes dissolvidos, dificilmente retirados pelas BMP's estruturais. Reforça-se que os valores obtidos devem ser enxergados como estimativas, visto que o resultado efetivo varia de região para região, em função das peculiaridades locais, manutenção e considerações específicas de cada BMP, além do mais sendo no Brasil, que carece de pesquisas sobre o tema.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os mananciais, sendo importantes áreas para o desenvolvimento urbano, social, humano e de garantia da saúde e da preservação dos direitos fundamentais de cidadania, merecem atenção quanto à qualidade de suas águas, e que fundamentalmente, dependem do planejamento e da gestão adequada da bacia em que estão inseridas.

A poluição difusa ganha espaço nesta discussão, uma vez que afeta diretamente a qualidade dos corpos hídricos. A utilização consciente do solo, atrelada ao cuidado com o meio ambiente, tem o poder de regular a quantidade de tempo, recurso humano e recurso econômico na garantia da segurança hídrica. Neste contexto, a adoção de medidas de controle desta poluição é de importância para a promoção da sustentabilidade da interação entre o ser humano e o ambiente.

O manancial de abastecimento público da bacia do Rio Passaúna, na Região Metropolitana de Curitiba, reflete estes aspectos, considerando a relevância de seu uso como abastecimento de grande parte da população, ao mesmo tempo em que é ocupado por considerável porção urbana.

Para iniciar discussões acerca da proteção dos mananciais considerando os aspectos de poluição difusa, com estudo de caso específico na bacia do Passaúna, apresentou-se método de identificação de poluentes relacionado com o uso do solo e seus possíveis trajetos até o corpo hídrico, de forma a destacar potenciais locais passíveis de sofrerem medidas de intervenção.

O método desenvolvido nessa pesquisa e aplicado à bacia do Passaúna ofereceu uma percepção da influência de diferentes poluentes e seus riscos de contaminação das águas ao serem carregados em escoamento superficial. A análise visual dos mapas obtidos pelo processo de georreferenciamento é simples e acessível para qualquer bacia, seja manancial ou não. Ainda que, para sua aplicação, seja necessário o domínio da ferramenta GIS, as informações necessárias para sua execução são de livre acesso pelos sistemas de acesso à informação na rede, permitindo sua utilização de maneira ampla. A principal contribuição dessa pesquisa é a oportunidade de avaliar potenciais medidas de solução de controle quali-quantitativo em escala de realização com forte impacto de transformação.

A base para a aplicação do método proposto em qualquer bacia provém da confiabilidade de restituição destes dados georreferenciados e com a estrutura de base de dados para sua aplicação. Os dados utilizados no estudo de caso aqui desenvolvido têm respeitável nível de confiabilidade por originarem-se de órgãos governamentais e com as respectivas resoluções espaciais.

As limitações desse estudo estão ligadas à natureza de potenciais fontes de poluição difusa como a desconsideração de ruas e avenidas na bacia analisada. Além disso, uma base de dados em escala mais precisa poderia ter desenvolvido resultados mais significativos quanto ao caminho crítico dos poluentes. Tais dados afetaram, também, os resultados dos mapas de risco, uma vez que podem ter indicado declividades mais

baixas do que as existentes ou até nulas por conta do espaçamento entre as curvas de nível – de 20 em 20 metros – e a dimensão das quadrículas do raster aplicadas – de 10m por 10m.

As implicações desta última constatação podem ter afetado os mapas de risco apresentados, uma vez que o valor do risco pode ter se apresentado baixo por conta de declividades equivocadamente inferiores. Estes mapas, sendo a composição das concentrações de poluentes por uso do solo, declividade e CN, foram afetados pela instabilidade de tais parâmetros da mesma maneira. Ainda que os valores obtidos de risco não tenham significado tangível, são importantes as proporcionalidades dos valores que o compõe.

Neste cenário, convém discutir que a definição de apenas três categorias de risco (baixo, médio e alto) e a forma de divisão de tais classes afeta a tomada de decisão dos locais passíveis de intervenção. Os mapas de concentração de poluentes devem, pois, ser observados com cautela, uma vez que não há fontes nacionais que relacionem a concentração de poluentes por utilização do solo, com a classificação regional utilizada. Além disso, as divisões de risco foram aplicadas por um método de análise numérica, não analisando quais as taxas de concentração de poluentes que realmente serão críticas para o enquadramento dos corpos hídricos ou somente para a qualidade destes. As fontes internacionais adotadas, apesar de potenciais diferenças com a natureza da dinâmica da matriz de fontes de poluição, puderam servir de parâmetro comparativo entre os locais para análise aqui indicadas e sendo fundamentais para a escolha posterior do local de implantação da BMP.

Para o auxílio da localização exata de implementação da BMP, fez-se uso dos mapas de caminhos críticos, estabelecidos através de algoritmo no ArcGIS. Tais mapas revelaram caminhos importantes do fluxo do escoamento superficial e, ainda que não delimitassem especificamente o local para aplicação de medidas estruturais, serviram como orientação de locais onde não as implementar, de forma a otimizar sua aplicação.

No tocante à viabilidade das BMP's, observou-se que sua aplicação é eficaz, sendo capaz de remover consideravelmente os poluentes carregados pelo escoamento superficial, ao passo que ainda contribui com a diminuição dos picos de descarga e vazão do escoamento superficial. No presente trabalho, fez-se a análise da aplicação de apenas uma medida estrutural, sendo necessário, para real atingimento do objetivo da bacia, a completa análise dos locais em risco, juntamente com as potenciais áreas de aplicação de BMP's e adequado projeto e execução das práticas, estruturais e não-estruturais, além da análise de diferentes propostas de BMP's para a escolha da mais adequada, levando em consideração a análise econômica e sua eficiência. Outra abordagem possível seria a reaplicação do método, considerando a diminuição da poluição difusa, de acordo com a eficiência da BMP aplicada na área em questão, a fim de compreender a influência desta na bacia.

Apesar do profundo estudo desprendido neste trabalho, alguns fatores foram limitantes para uma análise ainda melhor da aplicação das BMP's. A carência de estudos sobre o tema no Brasil levou à adoção das técnicas adotadas por outros países, que levam em conta as peculiaridades locais, que podem ser diferentes das brasileiras. Somado a isso, para realização de um projeto mais adequado, alguns fatores ignorados aqui, em virtude das limitações financeira e de tempo, deveriam ser analisados, tais como maior análise do solo onde a BMP é construída, identificando sua real taxa de infiltração, análise topográfica mais adequada, localização da altura do lençol freático, entre outros aspectos.

Dessa forma, o método apresentado propõe-se a servir como ferramenta de auxílio aos gestores hídricos, fornecendo a eles informação suficiente para tomada de decisões nas bacias de manancial. A identificação de potenciais locais com risco de poluição, aliado a um adequado projeto de gerenciamento de águas pluviais, torna-se ponto importante para o objetivo de conservação da água. Entretanto, vale ressaltar que a responsabilidade pela preservação das áreas de manancial cabe a todos, incluindo poder público, companhias de saneamento e também à toda população, carecendo de engajamento mútuo de todas as partes interessadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2017: Relatório Pleno. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/>>. Acesso em: 10 abr. 2018.
2. BRAGA, B. et al. Introdução à Engenharia Ambiental: O desafio do desenvolvimento sustentável. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

3. BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n° 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Ministério da Saúde, Brasília, DF, 12 dez. 2011.
4. CARVALHO, B. A. Ecologia aplicada ao saneamento ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 1980.
5. COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. Plano Diretor SAIC: Sistema de Abastecimento de Água Integrado de Curitiba e Região Metropolitana. Curitiba: Sanepar, 2013.
6. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n° 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, n. 53, 18 de mar. 2005.
7. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n. 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Diário Oficial da União, Brasília, n. 92, 16 de mai. 2011.
8. CONSTRUCTION INDUSTRY RESEARCH AND INFORMATION ASSOCIATION. The SuDS Manual. Londres, 2015.
9. CURITIBA. Lei n° 9800, de 03 de janeiro de 2000. Dispõe sobre o Zoneamento, Uso e Ocupação do Solo no Município de Curitiba e dá outras providências. Câmara Municipal de Curitiba, Curitiba, jan. 2000.
10. DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION OF PENNSYLVANIA. Pennsylvania Stormwater Best Management Practices Manual. Harrisburg, 2006.
11. DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION OF NEW JERSEY. New Jersey Stormwater Best Management Practices Manual. 2016.
12. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Guidance Manual for Developing Best Management Practices (BMP). Washington, 1993.
13. FERREIRA, D. B. Nonpoint Pollution and Best Management Practices assessment using geographic information systems data-application in the Barigui Basin, State of Paraná. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
14. FUNDO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A INFÂNCIA. Progress on Sanitation and Drinking Water. Geneva, 2015.
15. GIRI, S.; QIU, Z. Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century: A review. Journal of Environmental Management. v. 173, p. 41-48, mar. 2016.
16. HELLER, L.; PÁDUA, V. L. Abastecimento de Água para Consumo Humano: Volume 1. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.
17. HELLER, L.; PÁDUA, V. L. Abastecimento de Água para Consumo Humano: Volume 2. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.
18. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico de 2010, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 14 abr. 2018.
19. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Manual técnico de uso da terra. 3. ed. Rio de Janeiro, 2013.
20. INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA. Curitiba: 1998-2018. Disponível em: <<http://www.aguasparana.pr.gov.br/pagina-79.html>>. Acesso em: 23 jan. 2018.
21. INSTITUTO TRATA BRASIL. Perdas de Água: Desafios ao Avanço do Saneamento Básico e à Escassez Hídrica – 2015. São Paulo, 2015.
22. JÄRVELÄINEN, JUHANI. Land-use based stormwater pollutant load estimation and monitoring system design: Case of Lahti city, Finland. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Meio Ambiente) – Escola de Engenharia, Aalto University, 2014.
23. KOZAK, C. Water quality assessment and its effects on diffuse pollution considering a new water quality and quantity approach. 2016. 265 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
24. LIBÂNIO, M. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. 2. ed. Campinas: Átomo, 2008.
25. LOLLO, J. A. A influência do uso e ocupação do solo na qualidade da água. In: AMÉRICO-PINHEIRO, J. H. P.; MIRANTE, M. H. P.; BENINI, S. M. Gestão e Qualidade dos Recursos Hídricos: conceitos e experiências em bacias hidrográficas. Tupã: ANAP, 2016. p. 20-39.
26. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Mananciais. Disponível em <<http://mma.gov.br/cidades-sustentaveis/aguas-urbanas/mananciais>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

27. MINNESOTA STORMWATER MANUAL. Design criteria for infiltration. Disponível em: <https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php?title=Design_criteria_for_infiltration>. Acesso em: 29 de outubro de 2018.
28. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. 2010 UN Summit. New York. Disponível em: <<http://www.un.org/en/mdg/summit2010/>>. Acesso em: 14 abr. 2018.
29. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Resolução n. 16/2, de 8 de abril de 2011. O direito humano à água potável e ao saneamento. General Assembly, New York, abr. 2011.
30. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/>>. Acesso em: 14 abr. 2018.
31. PARANÁ. Decreto nº 458, de 5 de junho de 1991. Dispõe sobre a criação da área de proteção ambiental localizada nos municípios de Almirante Tamandaré, Araucária, Campo Largo e Curitiba. Diário Oficial nº 3526, Curitiba, PR, 5 jun. 1991.
32. PARANÁ. Decreto nº 5.063, de 20 de novembro de 2001. Altera e atualiza o Zoneamento Ecológico Econômico da Área de Proteção Ambiental denominada APA Estadual do Passaúna da Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos - SEMA. Curitiba, PR, 2001.
33. PARANÁ. Decreto nº 8.536, de 20 de dezembro de 2017. Altera o Zoneamento Ecológico Econômico da Área de Proteção Ambiental denominada APA Estadual do Passaúna, definido pelo Decreto Estadual nº 5063, de 20 de novembro de 2001. Diário Oficial nº 10093, Curitiba, PR, 21 dez. 2017.
34. PARANÁ. Lei nº 13.027, de 22 de dezembro de 2000. Dispõe sobre a delimitação do perímetro da Área de Proteção Ambiental – APA do Passaúna, definida no artigo 3º, do Decreto Estadual nº 458/91. Diário Oficial nº 5892, Curitiba, PR, 26 dez. 2000.
35. PARANACIDADE. Curitiba: 2006-2018. Disponível em: <<http://www.aguasparana.pr.gov.br/pagina-79.html>>. Acesso em: 23 jan. 2018.
36. PINTO, N. L. S. et al. Hidrologia Básica. São Paulo: Editora Blucher, 1976.
37. PORTAL BRASILEIRO DE DADOS ABERTOS. Brasília: 2011-2018. Disponível em: <<http://dados.gov.br/>>. Acesso em 15 abr. 2018.
38. SARTORI, A. Avaliação da Classificação Hidrológica do Solo para a Determinação do Excesso de Chuva do Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
39. SHAW, D.; SCHMIDT, R. Plants for Stormwater Design: Species Selection for the Upper Midwest. Minnesota Pollution Control Agency. Saint Paul, 2003.
40. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto – 2015. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 14 abr. 2018.
41. SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL. Londrina: 1998-2008. Disponível em: <<http://www.aguasparana.pr.gov.br/pagina-79.html>>. Acesso em: 23 jan. 2018.
42. SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL. Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba. SUDERHSA: Curitiba, 2002.
43. SUGUIO, K. Água. Ribeirão Preto: Holos, 2006.
44. TSUTIYA, M. T. Abastecimento de Água. 4. ed. São Paulo: DEHSEP/USP, 2006.
45. TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2012.
46. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Urban Hydrology for Small Watersheds. Washington, 1986.
47. VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos: Volume 1. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2017.
48. WASHINGTON STATE OF DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Airport Stormwater Design Manual. Washington, 2008.
49. WILKEN, P.S. Engenharia de drenagem superficial. 1 ed. São Paulo: CETESB, 1978.
50. ZHAO, J. et al. Influences of land use on water quality in a reticular river network area: a case study in Shanghai, China. Landscape and Urban Planning. v. n. 137, p. 20-29, jan. 2015.