

10 Estratégias de infraestrutura verde para mitigação da poluição atmosférica no ambiente urbano

Thiago Luiz Salvadeo Santos
Leandro Luiz Giatti
Thiago Nogueira

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, no mundo todo, a aglomeração em centros urbanos tem crescido consideravelmente. Segundo o relatório do Programa de Assentamentos Humanos das Nações Unidas (UN-HABITAT, 2022), 55% da população mundial vive em áreas urbanizadas. Até 2050 a previsão é de 68% de ocupação urbana. No entanto, países em desenvolvimento possuem um processo de urbanização mais acelerado, resultando em impactos negativos como a exploração de recursos naturais, devastação de ecossistemas terrestres, perda da biodiversidade, aplicação de fertilizantes químicos, degradação ambiental da água, do solo e do ar. O aumento de áreas impermeabilizadas têm provocado a redução de vegetações nativas.

A oferta de serviços e atividades remuneradas, consolidada nas regiões centrais das cidades, provoca o fluxo de pessoas e maiores deslocamentos, que em sua maioria, são realizados por veículos automotores. O aumento da frota de automóveis, ônibus e motocicletas, movidos a com-

bustíveis fósseis, não renováveis, geram poluentes atmosféricos, que são um dos fatores de risco e de impacto ao meio ambiente e à saúde humana.

Elevados níveis de poluentes são uma ameaça à qualidade de vida humana, particularmente àquelas pessoas que se encontram em alta vulnerabilidade social. Países de média e baixa renda são acometidos por uma maior exposição aos poluentes atmosféricos, sendo 89% das mortes prematuras no mundo ocorridas nesses lugares (WHO, 2022). A maioria dos países afetados concentram-se nas regiões do Sudeste Asiático e do Pacífico Ocidental em áreas urbanas com grandes contingentes populacionais (WHO, 2022).

Estima-se que a poluição do ar tenha causado 4,2 milhões de mortes prematuras em todo o mundo durante o período de 2019, em áreas urbanas e rurais (WHO, 2022). Essa marca aponta a gravidade dos efeitos da poluição do ar na saúde humana e alerta para o desenvolvimento de doenças crônicas associadas às questões cardiovasculares, respiratórias e ligadas à saúde mental. A Organização Mundial da Saúde (OMS) reporta que 37% das mortes prematuras são relacionadas à poluição do ar externo, causadas por doenças cardíacas isquêmicas e acidente vascular cerebral; 18% por doença pulmonar obstrutiva crônica; 23% por infecções respiratórias agudas inferiores e; 11% devido a câncer no trato respiratório (WHO, 2022).

Alguns grupos de pessoas são mais suscetíveis aos malefícios da exposição ao ar poluído provocado pela emissão de material particulado (MP), mesmo por curtos períodos, que resultam em internações hospitalares por causas cardíacas e pulmonares, ataques de asma, bronquite crônica e aguda, e sintomas respiratórios (Keyes et al., 2023; Liu et al., 2019). Por outro lado, os efeitos a longo prazo podem promover doenças crônicas, como a doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC) em indivíduos que apresentam quadro de asma crônica, insuficiência pulmonar, doenças cardiovasculares e mortalidade cardiovascular (Manisalidis et al., 2020). Além disso, a exposição prolongada pode gerar distúrbios mentais e perinatais, resultando em óbitos de crianças e doenças crônicas na fase adulta (Mocelin; Fischer; Bush, 2022).

As fontes de poluição do ar em ambientes externos precisam de atenção, uma vez que atingem pessoas de maneiras diferentes. Para isso, ações devem ser tomadas por formuladores de políticas no âmbito local, regional, nacional e internacional, bem como articulação com setores de planejamento urbano, energia, saúde, transporte, educação, resíduos sólidos e agricultura. Além disso, é importante que políticas, programas, projetos e ações se conversem e tenham direcionamentos convergentes.

Por sua vez, o continente europeu registrou uma redução no número de mortes prematuras, durante o ano de 2019, em comparação com o ano de 2018. O relatório da Agência de Proteção Ambiental Europeia (2021) estima que o decréscimo nas concentrações atmosféricas deste poluente tenha contribuído para uma redução das mortes prematuras atribuídas à exposição de dióxido de nitrogênio (NO_2), atingindo um percentual de 16%, seguido de 11% de MP fino e 9% de exposição ao ozônio (O_3).

Em 2021, a OMS atualizou as diretrizes que estabelecem níveis de concentração para a qualidade do ar (WHO, 2021b). Destacam-se seis poluentes que mostraram maior risco à saúde: MP inalável e inalável fino (MP_{10} e $\text{MP}_{2,5}$), O_3 , NO_2 , dióxido de enxofre (SO_2) e monóxido de carbono (CO).

O MP fino causa transtornos graves ao ser humano, sendo filtrado pelos pulmões e distribuído pela corrente sanguínea até atingirem os órgãos. Além disso, a ação de massas de ar pode espalhar esses poluentes e depositar partículas em ressuspensão do solo na vegetação urbana (Ristorini et al., 2020), aumentando a área contaminada e atingindo ainda mais pessoas.

O O_3 , por sua vez, tem a capacidade de gerar danos às produções agrícolas e às porções de florestas e vegetações em áreas rurais. Entretanto, no espaço urbano seu efeito pode ser ainda mais nocivo, devido à redução do crescimento arbóreo, perda da biodiversidade e perturbação dos serviços ecossistêmicos (EEA, 2022).

Óxidos de nitrogênio (NO_x) são transportados pelo fluxo de ar e ficam depositados no solo e em corpos hídricos, resultando em quantias excessivas de nitrogênio. Em rios e córregos, o excesso de NO_x e amônia (NH_3) contribuem para o processo da eutrofização, resultante da proliferação de algas e redução da disponibilidade de oxigênio para outros seres vivos. Em ecossistemas terrestres, a deposição de quantidades excessivas de nitrogênio pode também reduzir a biodiversidade de vegetações nativas mais sensíveis e, eventualmente, promover a propagação de espécies invasoras que consomem altos níveis de nitrogênio, além de mudanças estruturais e função ecossistêmica (EEA, 2022).

Efeitos similares acontecem com a deposição de SO_2 alterando a composição química do solo e dos cursos d'água, conhecido pelo processo de acidificação. Elementos potencialmente tóxicos, como o chumbo (Pb), percorrem longos percursos da fonte poluidora até o receptor e se depositam em áreas agrícolas, contaminando o solo e ampliando os impactos na cadeia alimentar (EEA, 2022).

Áreas urbanas sofrem com a emissão de poluentes de fontes fixas e móveis, porém grande parte das fontes poluidoras empregam a queima de

combustíveis não renováveis, que aumentam a deterioração da qualidade do ar.

Estratégias para a contenção da poluição atmosférica urbana podem ser implementadas com políticas de fomento ao uso de combustíveis renováveis e uso de automóveis elétricos. Além disso, outras medidas podem ser adotadas pelos cidadãos, como utilização de transporte público coletivo, realização de dietas saudáveis orgânicas, monitoramento participativo de pessoas sobre poluentes e desenho urbano (Sofia et al., 2020). Ainda, a expansão do verde urbano, como o conjunto de arborização urbana, jardins públicos e privados, resíduos viários, praças e parques, reduzem os efeitos da poluição do ar em ambientes urbanos.

De acordo com Benedict e McMahon (2006), a infraestrutura verde compreende uma rede de espaços verdes interconectados por um sistema de áreas livres. Esta abordagem coloca o verde na forma de um instrumento de gestão ambiental em consideração aos serviços ecossistêmicos providos, que podem gerar importantes subsídios para a qualidade de vida, sendo também atributos de suporte à vida. Algumas tipologias, associadas à infraestrutura verde, podem auxiliar planejadores urbanos a introduzirem elementos vegetativos para mitigação de poluentes.

Cânions urbanos e ruas abertas são algumas das situações do espaço urbano que frequentemente causam uma maior vulnerabilidade urbana. Vulnerabilidade urbana e social se estabelecem quando a exposição ao perigo representa um risco provável às ocorrências e extensão do impacto (Tolffo; Giatti, 2021). A utilização de arborização, cercas vivas, arbustos, paredes verdes e tetos verdes pode contribuir para proteger pedestres e cidadãos das fontes poluidoras. Entretanto, o uso excessivo de plantio de árvores em cânions urbanos pode agravar as concentrações e efeitos da poluição em âmbito local¹, além de que nem sempre grandes quantidades de árvores resultam em uma boa absorção de poluentes gasosos pelas folhas, como também não retém quantidades significativas de poluentes sólidos pelas superfícies foliares e pelas cascas (Abhijith et al., 2017; Locosselli, 2020).

Este capítulo tem como objetivo discutir a contribuição da infraestrutura verde para a mitigação da poluição atmosférica e diretrizes que podem ser adotadas pela sociedade civil, tomadores de decisão e o setor empresarial para reduzir a exposição das pessoas aos poluentes atmosféricos.

1 A configuração de uma via estreita com a presença de edificações altas onde existem indivíduos arbóreos de copas frondosas e volumosas podem provocar a concentração de poluentes atmosféricos.

METODOLOGIA

Utilizou-se como método de estudo a revisão bibliográfica a partir da busca de artigos científicos, guias de orientação e teses no Google Acadêmico, *Science Direct*, *Scopus*, além de outros conhecidos pelos autores, no que diz respeito às áreas do conhecimento sobre poluição atmosférica, impactos na saúde humana, infraestrutura verde, tipologias vegetativas empregadas nas cidades e instrumento ambiental de planejamento urbanístico.

O estudo adotou as seguintes palavras-chaves: *air pollution*/poluição do ar; *human health*/saúde humana; *urban canyons*/cânions urbanos; *open streets*/ruas abertas; *green infrastructure*/infraestrutura verde; *mitigation*/mitigação. As publicações foram limitadas a filtragem de um período equivalente aos últimos treze anos. Como critério de inclusão foi empregado a leitura de resumos para verificar se os atributos dos artigos se encaixam aos objetivos da pesquisa. A partir disso, a seleção dos artigos foi dividida em seções no que se refere à poluição atmosférica no ambiente urbano, impactos na saúde humana e no meio ambiente, infraestrutura verde para mitigação, situações de cânions urbanos e ruas abertas, e aplicação da quota ambiental no planejamento urbano.

Foram selecionadas produções científicas e guias de recomendações por meio de um filtro temporal entre os anos de 2010 e 2023. A leitura dos títulos, das palavras-chaves e dos resumos contribuíram para trabalhar e fundamentar bases conceituais para o estudo. As referências levantadas contribuíram para a seleção de diretrizes e situações aplicadas em nível local que buscam reduzir os níveis de poluição do ar por meio de tipologias vegetativas em espaços denominados por ruas abertas e cânions urbanos. Além disso, as referências fomentaram uma discussão em relação à aplicação do instrumento de planejamento urbano, vinculado ao licenciamento imobiliário, Quota Ambiental, na cidade de São Paulo.

POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA NO AMBIENTE URBANO

Áreas urbanas demandam esforços para a realização de atividades humanas, desde a produção de energia até a distribuição de alimentos. Entretanto, a ocupação de áreas mais afastadas do centro urbano promoveu maiores deslocamentos para regiões periféricas. A abertura de ruas e a expansão viária possibilitaram o uso de automóveis para o transporte individual de pessoas e mercadorias. Por outro lado, a dependência de carros e ônibus têm gerado elevadas concentrações de poluentes atmosféricos e impactos ambientais consideráveis (Carvalho, 2011).

A predominância de indústrias em zonas urbanas é um fator que causa desconforto para moradores locais, devido aos efeitos associados à contaminação da água e à poluição do ar. As fumaças lançadas pelas chaminés das indústrias, antigamente vinculadas ao desenvolvimento e ao progresso econômico, atualmente são vistas como causa de problemas à saúde humana. Além disso, outros fatores de risco podem ser observados pelas alterações climáticas e pela degradação dos ecossistemas (Malheiros, 2014).

Os poluentes atmosféricos são classificados pelo seu estado físico, dessa forma, apresentam-se em estado gasoso e particulado, que são oriundos majoritariamente da ação humana. Em alguns casos acontecem de forma natural, como o pólen e as emissões de erupções vulcânicas. Alguns poluentes ficam suspensos no ar e podem percorrer longas distâncias por meio de ventos para outros lugares (Floss et al., 2022). Os contaminantes atmosféricos podem ter sua origem em fontes móveis (carros e motocicletas, por exemplo) e fontes fixas (extração mineral, agricultura e setor industrial).

A emissão desses poluentes implica impactos ambientais adversos em águas subterrâneas, no solo e no ar, causando doenças não transmissíveis e mortes prematuras (Manisalidis et al., 2020).

Os poluentes também podem ser classificados como primários e secundários. Os primários são aqueles produzidos pelo setor industrial, por usinas termoeletricas e veículos automotores providos de motores de combustão. Nessa categoria, surgem os materiais particulados, o CO, os NO_x , SO_2 e os compostos orgânicos voláteis (COVs). Os poluentes secundários são gerados por reações de oxidação fotoquímica, sendo os principais exemplos o O_3 e o MP secundário.

O MP é definido como mistura complexa de compostos orgânicos e inorgânicos em estado sólido ou líquido, suspensos no ar, subdivididos conforme a variação do diâmetro em: material particulado inalável (MP_{10} , partículas com diâmetro menores do que $10\text{ }\mu\text{m}$) e material particulado inalável fino ($\text{MP}_{2,5}$, partículas com diâmetro menores do que $2,5\text{ }\mu\text{m}$). Para exemplificar suas dimensões, as partículas de MP_{10} são menores que um fio de cabelo, enquanto as partículas de $\text{MP}_{2,5}$ são menores que uma hemácia (Floss et al., 2022). Geralmente, tem origem na queima de combustíveis fósseis, como também de processos industriais, incineração de resíduos, queima de carvão mineral e fogões a lenha. Por outro lado, podem ser originados por formações naturais, como pólenes e bioaerossóis.

O CO é um gás tóxico incolor e inodoro, constituído a partir da combustão incompleta de combustíveis de origem orgânica. A emissão por fontes naturais está voltada às atividades vulcânicas, gás natural e descargas elétricas, como por atividades antrópicas, como fornos a lenha, aquecimen-

to a gás, usinas termelétricas, queima de biomassa, escapamento de automóveis e cigarros (Cetesb, 2010).

Os NO_x são concebidos por processo de combustão e englobam os poluentes monóxido de nitrogênio (NO) e o NO_2 (Cetesb, 2022). Sob a incidência de luz solar, o NO transforma-se em NO_2 e juntamente com os COVs contribuem para a formação do O_3 em superfície.

Os COVs são gases e vapores providos da queima incompleta e evaporação de combustíveis veiculares, pelo setor industrial e por processos de transferência de combustível (Cetesb, 2022). São exemplos de espécies presentes na atmosfera urbana os compostos aromáticos monocíclicos, como o tolueno, o etil-benzeno, o benzeno e os xilenos.

O SO_2 é um gás incolor com forte odor, também produzido pela queima de combustíveis fósseis, principalmente carvão, petróleo e minérios que contêm enxofre. Reage com outras substâncias presentes no ar, formando partículas de sulfato responsáveis pela redução da visibilidade na atmosfera (Cetesb, 2022).

Os poluentes secundários são gerados por reações de oxidação fotoquímica, como ocorre com o O_3 , a partir da catalisação entre os NO_x e COVs, na presença de luz solar e de calor nos períodos vespertinos de verão. A condensação de alguns poluentes gasosos (NO_2 e SO_2) pode provocar a névoa ácida, como ocorre com o NO_x e o MP secundário (Santos et al., 2021).

IMPACTOS DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA NA SAÚDE HUMANA E NO MEIO AMBIENTE

Em várias partes do mundo, concentrações de poluentes atmosféricos afetam sistematicamente a qualidade de vida humana, porém grupo de crianças, idosos e mulheres grávidas estão mais vulneráveis à poluição do ar, que provoca o desenvolvimento de doenças e mortes prematuras. Entretanto, fatores como nutrição, comorbidades, genética e aspectos socio-demográficos podem contribuir para a suscetibilidade de um indivíduo à exposição de poluição (WHO, 2021a).

Em ambientes poluídos, gestantes requerem maior cuidado com o desenvolvimento embrionário, quando expostas às elevadas concentrações de poluentes podem desenvolver problemas associados à diminuição do crescimento uterino, parto prematuro, baixo peso ao nascer, anomalias congênitas, mortes intrauterina e perinatal agravam o risco à saúde (Novaes; Gouveia; Medeiros, 2010).

Crianças e adolescentes são mais acometidos pela poluição durante a fase de crescimento dos órgãos e desenvolvimento dos sistemas imunoló-

gicos. Além disso, a primeira infância tem a saúde prejudicada, aumentando o risco de doenças crônicas posteriormente durante a fase adulta, como diabetes e dificuldade cognitiva (Paul et al., 2020).

Indivíduos com idade superior a 60 anos também estão mais vulneráveis, uma vez que o sistema imunológico apresenta dificuldades para lidar com as funções pulmonares eficientes, gerando obstrução das vias aéreas e limitação dos exercícios físicos (Arbex et al., 2012).

Segundo Nowak e Van Den Bosch (2019), a poluição do ar promove o agravamento de patologias respiratórias e cardiovasculares, como também intensifica a gravidade dos sintomas respiratórios. Quadros de falta de ar, tosse, irritação na garganta, asma e função pulmonar reduzida. Estudos mais recentes demonstram relação entre poluição atmosférica e eventos respiratórios agudos em pessoas com doenças pulmonares obstrutivas crônicas (DPOCs) e infecções respiratórias, aumentando o número de atendimentos em serviços de emergência e hospitais (Arbex et al., 2012). Casos mais avançados de exposição ao particulado fino ($MP_{2,5}$) apresentam a progressão de câncer de pulmão.

Hongsheng et al. (2023) salientam que os poluentes atingem o Sistema Nervoso Central (SNC) por meio da transmissão neural ao longo do nervo olfatório, filtragem de poluentes atmosféricos no pulmão e a circulação sanguínea. Em especial o particulado fino que atinge a cavidade nasal rapidamente e possibilita o contato direto com neurônios receptores olfativos.

Os efeitos da poluição atmosférica nas funções pulmonares de crianças durante os primeiros anos de vida são recorrentes, inclusive durante o período intrauterino. O sistema de imunidade de crianças não está plenamente desenvolvido, o que aumenta as chances de infecções respiratórias (Santos et al., 2021).

A poluição do ar pode causar efeitos agudos e crônicos sobre a saúde. Os efeitos agudos são aqueles que se revelam após um curto período, entre a exposição e os primeiros sintomas, em poucas horas ou dias. No entanto, os efeitos crônicos acontecem quando existe a exposição prolongada, apresentando sintomas após seis meses (São Paulo, 2022).

Um dos poluentes mais nocivos à saúde humana é o MP, devido aos danos produzidos no sistema respiratório. As partículas de menor tamanho ($< 2,5 \mu m$ de diâmetro) atingem alvéolos e a circulação sanguínea, e quando a exposição for prolongada, podem provocar efeitos mais graves, como problemas cardiovasculares, síndromes respiratórias e até mesmo óbitos.

Concentrações elevadas de NO_2 podem causar doenças pulmonares crônicas, prejudicar o sentido do olfato, além de irritação nos olhos, garganta e nariz, e em casos extremos acarretam óbitos. Outros problemas

causados por poluentes atmosféricos podem afetar a saúde humana como mostra a Figura 1.

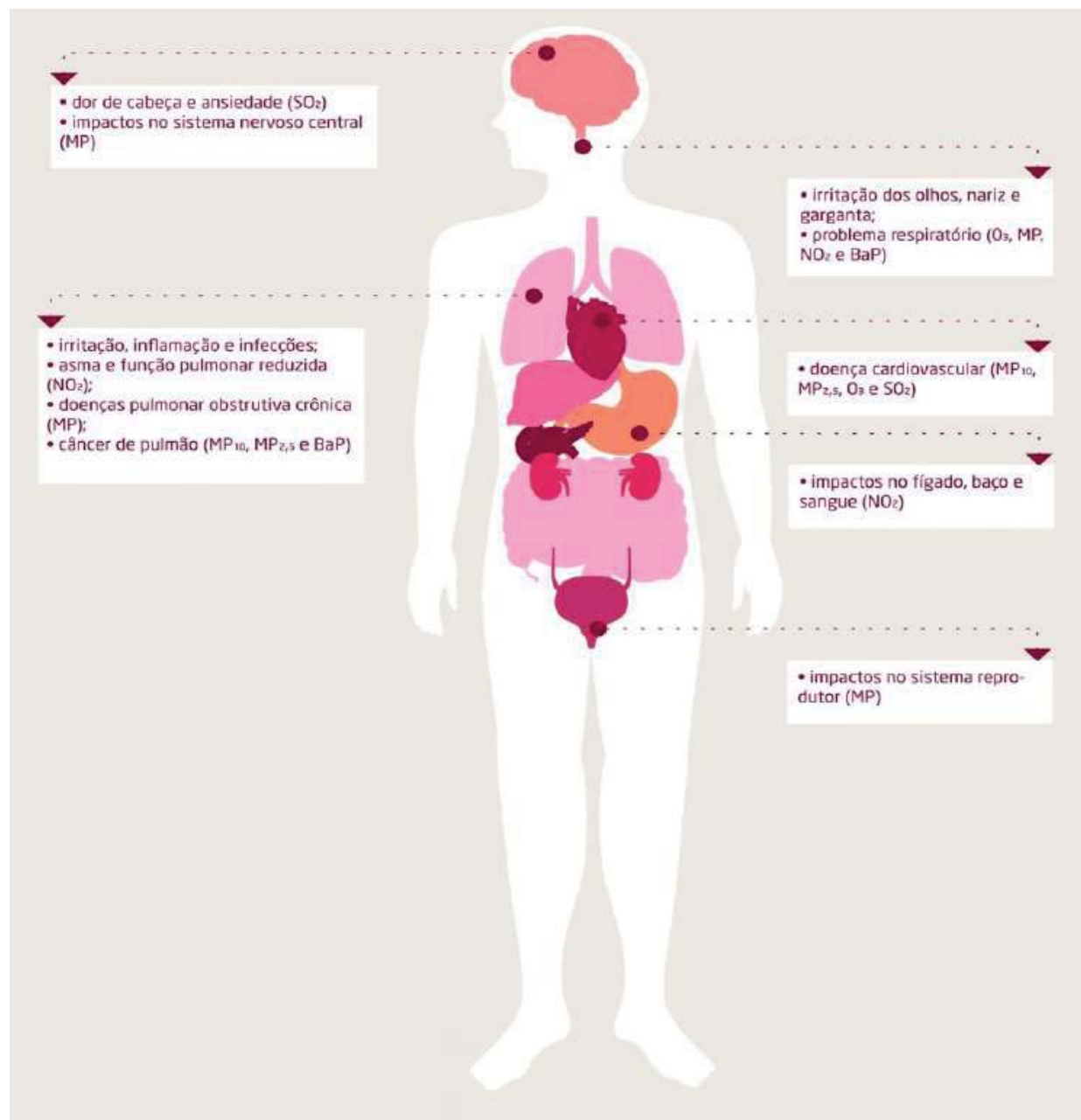


Figura 1 – Impactos da poluição do ar na saúde humana

Fonte: Adaptado pelos autores de EEA (2023).

Segundo Manisalidis et al. (2020), níveis elevados de NO_2 prejudicam hortas e vegetação urbana, pois reduzem o rendimento das colheitas e a eficiência do crescimento das plantas. Outro impacto negativo produzido pelo NO_2 é a redução da visibilidade e descoloração dos tecidos vegetais.

A INFRAESTRUTURA VERDE PARA MITIGAÇÃO DA POLUIÇÃO DO AR

Um dos grandes desafios para as cidades brasileiras é o planejamento de ações coordenadas para enfrentamento dos efeitos das mudanças climáticas, uma vez que políticas intersetoriais são fragmentadas e desarticuladas. As políticas públicas e instrumentos, normalmente não dialogam entre si frente e não levam em conta as alterações climáticas no planejamento urbano: planos diretores, planos de mobilidade urbana, saúde pública, saneamento, gestão de riscos, áreas verdes, drenagem e recursos hidrográficos.

O fomento aos planos de mitigação climática passa pelo ordenamento territorial da paisagem urbana e aspectos multifuncionais pelos quais a infraestrutura verde considera subsídios relevantes para a conservação da natureza. Medidas e conjunto de ações podem proteger e restaurar ecossistemas naturais, bem como ambientes já modificados pela ação humana, de maneira eficaz, sistêmica e adaptativa, a fim de promover o bem-estar e a biodiversidade (Caiche; Peres; Schenk, 2021).

A Infraestrutura Verde foi concebida por Benedict e McMahon (2006) como uma rede interconectada de espaços naturais e abertos urbanos que conservam valores e funções de ecossistemas naturais, dando suporte à água, ao ar limpo e ao ambiente terrestre equilibrado em virtude do bem-estar humano, resiliência urbana, e manutenção da fauna e flora. Manifesta-se por uma estrutura ecológica conjunta ao desenvolvimento social e econômico sustentável, a fim de colaborar para o planejamento urbano por meio de instrumentos de conservação dos espaços verdes (Ribeiro, 2010).

Para cada situação existem tipos de infraestrutura verde que auxiliam os tomadores de decisão a utilizarem adequadamente conforme as características do ambiente inserido. São trabalhadas escalas multifuncionais que melhor se adaptam ao desenho urbano, combinando elementos vegetativos e fatores hidrográficos. Para isso, dividem-se em escalas regionais, locais e particulares (Solera et al., 2020).

Tipologias urbanas aplicadas à escala regional se baseiam, especialmente, na bacia hidrográfica predominante, alternando entre áreas verdes urbanas, corredores verdes, espaços naturais protegidos e cinturão verde. Por outro lado, aquelas utilizadas em escala local – ruas, bairros e espaços livres abertos – são consideradas caminhos verdes, vias de uso múltiplo, hortas urbanas, bacias de retenção, bacias de detenção, alagado construído, canteiro pluvial, jardins de chuva, biovaletas, pavimento permeável e

interseção viária. No âmbito das edificações, em escala particular, são agrupadas as paredes verdes, telhados verdes, cisternas e jardins permeáveis (Solera et al., 2020).

Essas tipologias favorecem o combate às ilhas de calor e às alterações das condições climáticas provocadas pela incidência de edificações altas, pavimentos asfaltados, emissão de gases de efeito estufa, áreas industriais e supressão de áreas verdes. A manutenção de microclimas em áreas urbanas contribui para a transformação, purificação e eliminação de poluentes, agentes químicos e gases tóxicos (Ribeiro, 2010). Áreas verdes proporcionam o equilíbrio dos ciclos hidrológicos, o baixo consumo de energia, evitam desastres e permitem o embelezamento da paisagem urbana.

A infraestrutura verde tem a capacidade de promover benefícios para mitigação dos poluentes atmosféricos e outros mecanismos que melhoram a qualidade do ar, como alteração de padrões de dispersão, menor retenção de poluentes atmosféricos em cânions viários urbanos, redução da exposição humana à poluição e melhoria do conforto urbano e bem-estar (ISCAPE, 2019). Por outro lado, a implantação dessas tipologias traz algumas desvantagens como a dispersão de esporos de fungos, emissão de pólenes e compostos orgânicos voláteis biogênicos (COVBs). Desse modo, desencadeiam o aumento de agentes causadores de alergia e a deposição em ambientes urbanos. Ações de implementação devem considerar assertivamente espécies nativas do bioma predominante que otimizem os benefícios e minimizem os impactos não intencionais gerados, como por exemplo, o uso de espécies invasoras que possam desequilibrar os ecossistemas (ISCAPE, 2019).

Segundo Janhäll (2015), a vegetação urbana comporta-se por meio de mecanismos que contribuem para a melhoria da qualidade do ar em escala regional e local: a dispersão e a deposição.

A dispersão acontece por transporte físico, diluição e espalhamento de poluentes em diferentes escalas (Tomson et al., 2021). Fontes poluidoras provocam a emissão dos poluentes que são transportados por fluxos de ar até atingirem o receptor. Quanto maior a distância entre a fonte de emissão e o receptor, menor a concentração de poluentes encontrada. Diferentes variáveis influenciam no fenômeno de dispersão, resultando em uma maior ou menor concentração. No espaço urbano, as edificações e a topografia modificam a velocidade, a intensidade e a direção do vento. Edifícios muito altos e perfilados, alteram o fluxo do vento, provocando a concentração de poluentes e obstruindo a circulação de ar. Embora a topografia possa modificar a velocidade e direção de fluxos, áreas mais elevadas favorecem a circulação de ar, enquanto fundos de vale tendem a acumular poluição

atmosférica. A combinação de fatores meteorológicos como ventos, umidade do ar, radiação solar, temperatura ambiente e chuvas, interferem para o tempo de permanência dos poluentes na atmosfera. Em ambientes locais, a vegetação atua como um obstáculo semipermeável frente ao fluxo de ar entre a fonte de poluição e o receptor. A ação passiva reduz a exposição do receptor aos poluentes, por conta da mudança do fluxo de ar e das concentrações de poluentes, uma vez que a barreira vegetativa consegue reduzir a ação do vento perpendicular à rua. Para cada situação é preciso observar as características da vegetação, a topografia e as condições meteorológicas locais (Tomson et al., 2021).

A deposição é outro mecanismo que acontece quando partículas atmosféricas são transportadas pelo fluxo de ar e são depositadas em superfícies foliares, aquáticas ou terrestres. Janhäll (2015) afirma que parte das plantas possuem uma grande área de superfície por unidade de volume que aumenta a probabilidade de deposição em comparação às outras superfícies presentes no espaço urbano. A deposição seca ocorre quando partículas poluentes são depositadas em superfícies sólidas e são removidas gradativamente, conforme a ação interceptada e o tamanho da partícula. Tiwari et al. (2019) salientam que no âmbito local, a vegetação urbana em canteiros viários, tais como cercas vivas e árvores, atuam como uma barreira de filtragem das fontes de poluição do ar, protegendo o pedestre de poluentes atmosféricos. Na escala regional, a rede de florestas urbanas, parques, jardins e praças colaboram para a diluição atmosférica, como também agem como deposição seca. Poluentes gasosos e partículas transportadas pelo fluxo de ar se depositam em elementos vegetativos ao passarem sobre a superfície foliar. Particulados são regularmente depositados em espécies arbóreas, o que causa o bloqueio e insuficiência de luz solar, reduzindo a capacidade de fotossíntese. Outros resíduos podem atrapalhar as trocas gasosas das folhas por estarem depositados na superfície foliar, criando uma camada impermeável da célula vegetal (Cetesb, [2021]).

Espaços urbanos pavimentados causam sérios impactos desagradáveis às pessoas, resultando na superexposição à radiação solar, às enchentes e aos assoreamentos após chuvas intensas. A implantação da infraestrutura verde nas cidades propicia consideráveis ganhos de saúde ambiental, sejam eles físicos, sociais, econômicos ou estéticos (Figura 2). São inegáveis os ganhos climáticos e ambientais quando se adotam soluções verdes nas cidades (ISCAPE, 2019).

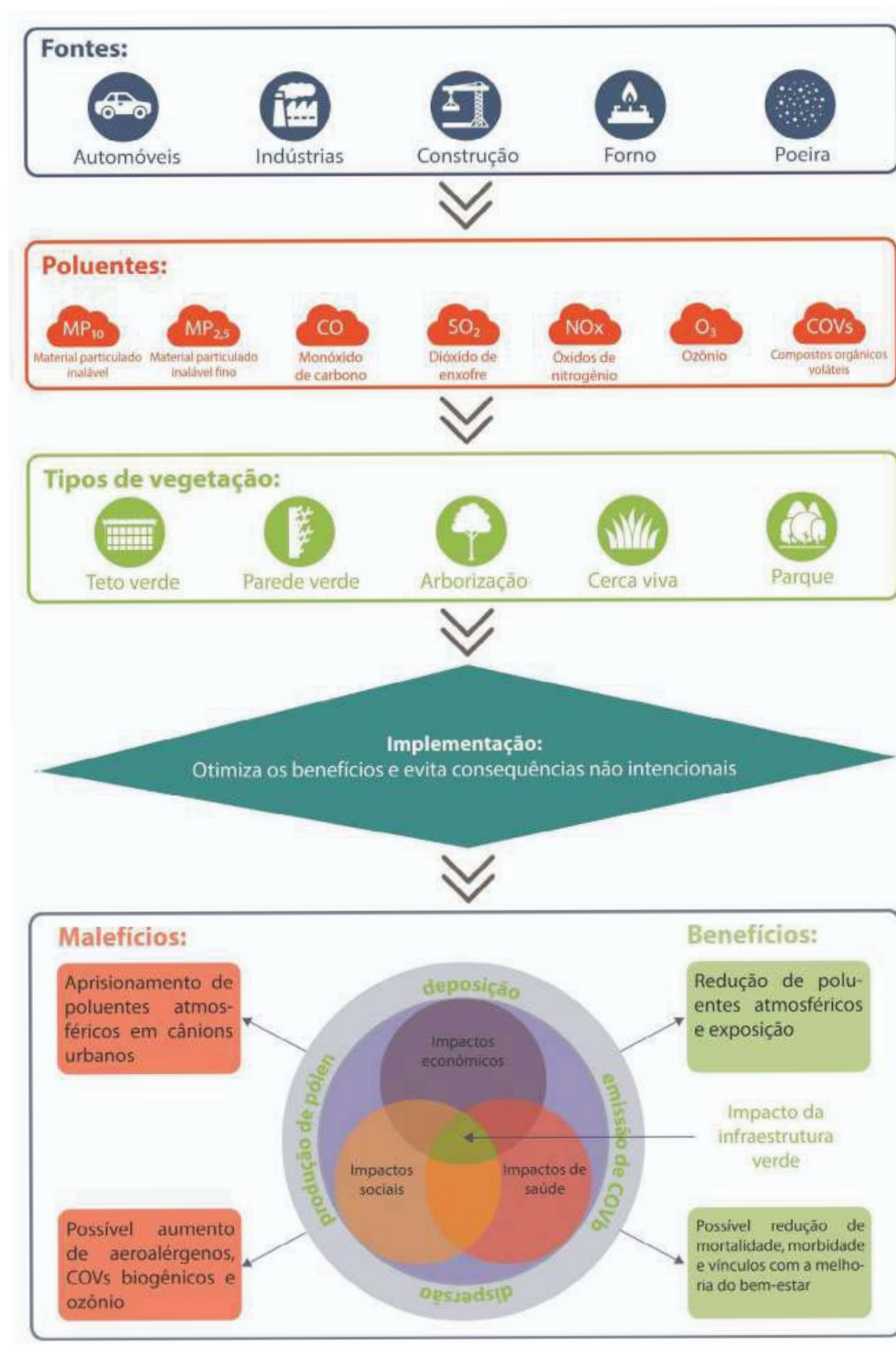


Figura 2 – Diagrama conceitual para mostrar a relação entre as fontes de poluição do ar, tipologias vegetativas, benefícios otimizados e consequências não intencionais

Fonte: Adaptado pelos autores de ISCAPE (2019).

CÂNIONS URBANOS

A qualidade do ar urbano está associada à dispersão de poluentes conforme o fluxo de ventos e a distribuição dos elementos urbanos no sistema viário. São definidos cânions urbanos ruas e avenidas que possuem grande quantidade de edifícios em ambos os lados da caixa viária (Abhijith et al., 2017). Outro fator que interfere na dispersão dos poluentes é a vegetação inserida nos cânions viários como estratégia de paisagismo urbano e periodicamente mantida pelos serviços de zeladoria dos órgãos públicos locais. As tipologias de infraestrutura verde geralmente utilizadas nas cidades contemplam árvores, arbustos, cercas-vivas e paredes verdes.

Existe uma relação entre ruas, tipologias vegetativas e distanciamento das edificações com a concentração dos poluentes do ar. A Figura 3 demonstra a maneira que os poluentes se relacionam entre o espaço viário e as edificações. Considera-se H a altura da edificação e W a largura da via, composta pelo leito carroçável e as calçadas. A relação de proporção indica padrões de dispersão de poluentes. Os cânions urbanos podem ser estabelecidos de acordo com sua proporção (Kumar; Abhijith; Barwise, 2019).

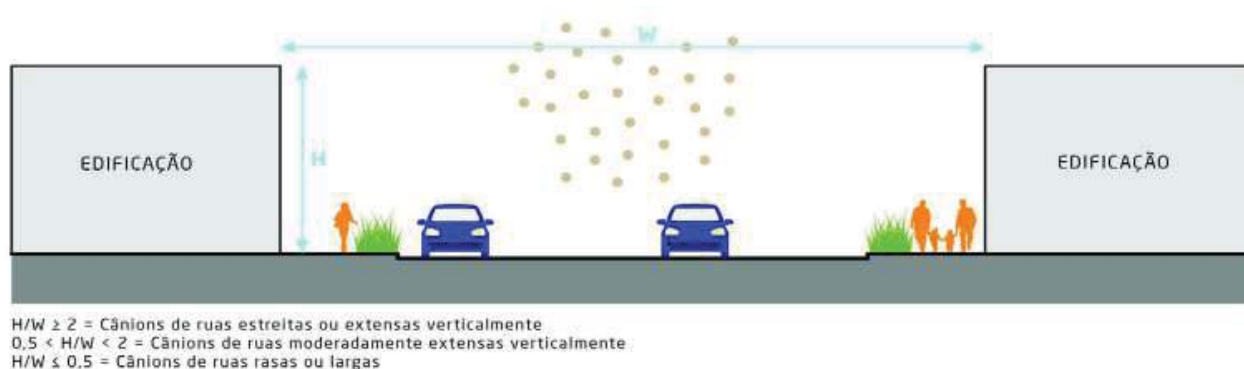


Figura 3 – Razão de aspecto

Fonte: Adaptado pelos autores de Kumar, Abhijith, Barwise (2019).

Cânions de ruas mais estreitas podem proporcionar um aumento de concentrações dos poluentes, independentemente de áreas verdes, por conta do ar poluído aprisionado no espaço e a falta de ar fresco para circular. Entretanto, a arborização urbana de grande porte pode resultar na degradação da qualidade do ar devido ao confinamento da poluição, como mostra a Figura 4. Kumar, Abhijith, Barwise (2019) consideram observar atentamente ao critério de escolha para o plantio de novas espécies arbóreas, assim como manutenção daquelas existentes que prestam serviços ecossistêmicos importantes para a promoção do bem-estar urbano. Toda

atenção e cuidado devem ser observados para plantios de reflorestamento urbano.

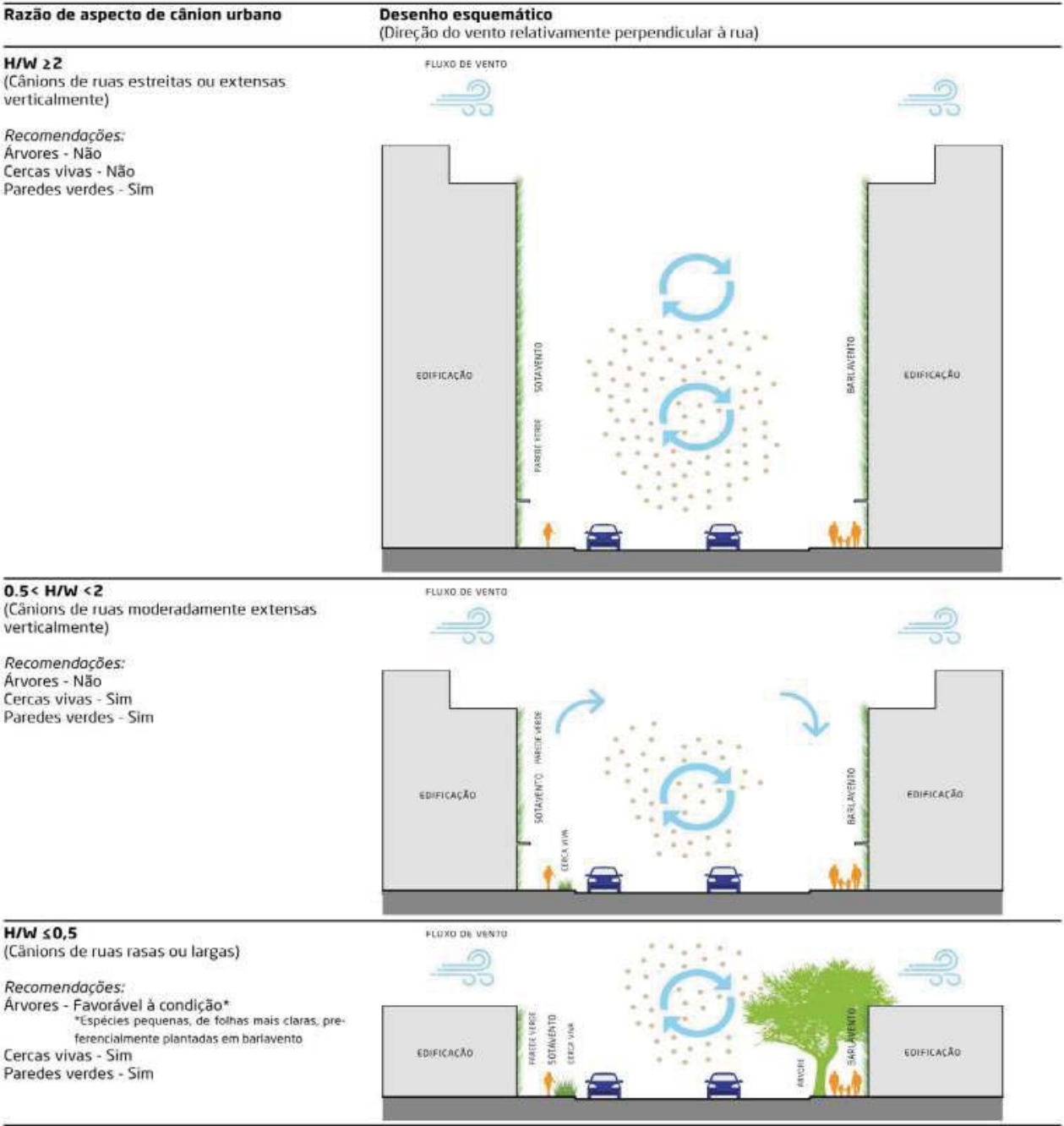


Figura 4 – Recomendações gerais para diferentes razões de aspectos de cânions urbanos

Fonte: Adaptado pelos autores de Kumar, Abhijith, Barwise (2019).

Em cânions de ruas estreitas o plantio de árvores pode levar a degradação da qualidade do ar decorrente do baixo fluxo de vento, assim reduzindo a dispersão e diluição de poluentes atmosféricos. Por outro lado, em condições de ruas abertas, as cercas vivas e as árvores atuam como barreira vegetativa entre a emissão dos automóveis e o pedestre, reduzindo as concentrações de poluentes de partículas do lado oposto (Quadro 1).

Quadro 1 – Recomendações gerais para diferentes razões de aspectos de cânions urbanos

Parâmetro de projeto	Considerações
Localização	Se o objetivo principal é reduzir a exposição de pedestres ou ciclistas, as cercas vivas devem ser plantadas próximas à rua, entre a calçada/ciclovias/ciclofaixa e o leito carroçável. Paredes verdes podem ser construídas em pilares de viadutos, muros de contenção e outros equipamentos verticais.
Seleção de espécies	Em cânions de ruas profundas, nenhuma forma de vegetação, exceto paredes verdes, é recomendada. Em cânions de profundidade média, arbustos, cercas vivas e paredes verdes podem ser plantadas, mas árvores não são recomendadas. Árvores grandes e densas devem ser evitadas em todas as situações, mas árvores menores ou com folhas mais claras podem ser plantadas em cânions de ruas rasas.
Espaçamento	As cercas vivas contínuas (sem vãos ou espaçamentos) proporcionam uma melhor redução da exposição de pessoas e ciclistas. Se as árvores forem plantadas (somente em cânions rasos), elas devem ser espaçadas generosamente umas das outras.
Altura	Para cercas vivas, recomenda-se uma altura de cerca de 2,00 m.
Espessura	Para cercas vivas, recomenda-se uma espessura de 1,50 m ou mais.
Densidade	Em cânions de rua, recomenda-se uma densidade maior para cercas vivas e uma densidade menor para árvores.

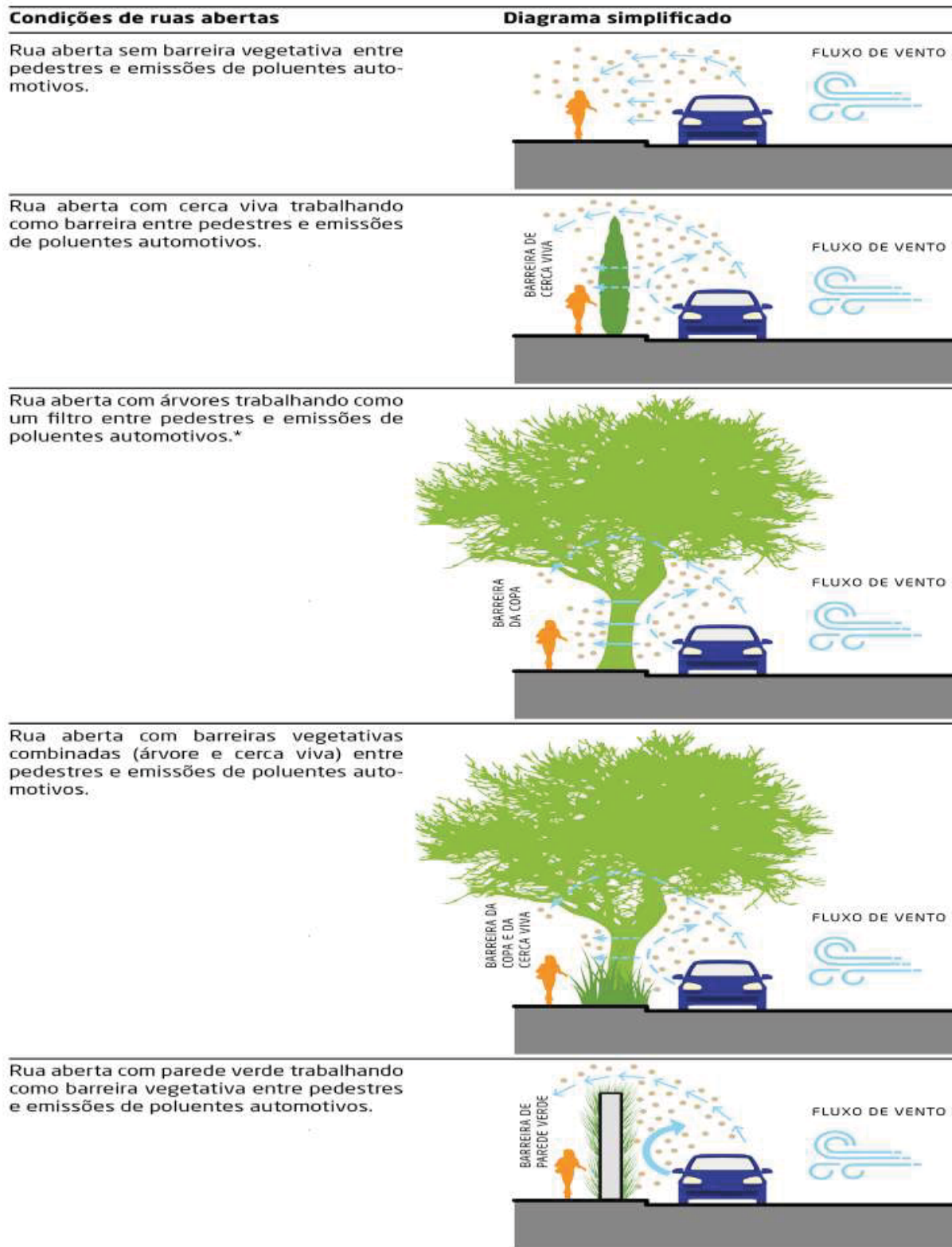
Fonte: Adaptado pelos autores de Kumar, Abhijith, Barwise (2019).

ESPAÇOS DE RUAS ABERTAS

As ruas e avenidas são espaços urbanos abertos que permitem a circulação de pessoas e veículos automotores, também conectam espaços construídos e áreas verdes de uma cidade. Nesses espaços utiliza-se tipos vegetativos adaptados às condições urbanas e às emissões de poluentes. Abhijith et al. (2017) ressaltam que árvores, cercas vivas, espécies arbustivas, praças, parques urbanos, paredes e tetos verdes, podem contribuir para o desenho urbano. Algumas espécies são plantadas ou têm ocorrência natural ao longo do sistema viário, formando corredores verdes e naturalmente criando barreiras naturais. A vantagem é o oferecimento de diversos benefícios, como abatimento de ilhas de calor, escoamento superficial da água de chuva, barreira contra ruídos, abrigo para avifauna, embelezamento urbano, entre outros.

Em vias abertas o conjunto de árvores sequenciadas atrelada a outras tipologias de vegetação colaboram como barreira entre as fontes poluidoras do leito carroçável e a passagem de pedestres em áreas de edifícios residenciais (Abhijith et al., 2017). Barreiras vegetativas acumulam concentrações de poluentes do ar no lado onde a vegetação está contra o vento, denominado barlavento. Dessa maneira, forçam o ar poluído a passar através da vegetação, variando a porosidade e dimensões físicas da vegetação. As vegetações de baixa densidade e alta porosidade resultam em uma maior infiltração do ar através da barreira, enquanto a de alta densidade e menor porosidade gera pouca ou nenhuma infiltração. Atrás da vegetação, isto é, na faixa de circulação de pedestres, as concentrações de poluentes do ar tendem a diminuir conforme a distância da rua. A deposição e a dispersão dos poluentes do ar dentro da barreira são controladas pela direção e pela velocidade do vento, posicionamento da vegetação, características físicas – espessura, altura e porosidade, temperatura, umidade relativa do ar e aspectos físicos das folhas.

As condições de rua aberta são definidas por espaços abertos, onde existe baixa presença de edifícios ou quando há edificações espaçadas umas das outras. Nessa situação, as correntes de ar não são impedidas e influenciadas por barreiras urbanas como os edifícios e outras infraestruturas. Ambientes urbanos possuem espaços para a arborização urbana e outras tipologias de vegetação onde podem ser plantadas em calçadas, canteiros e paredes laterais dos edifícios. O Quadro 2 traz as recomendações gerais para diferentes razões de aspectos de ruas abertas. A ilustração na Figura 5 representa o fluxo de vento e a dispersão de poluentes em condições de rua aberta.



*Sob algumas condições, devido ao efeito quebra-vento, os poluentes podem estagnar atrás de uma fileira esparsa de árvores, piorando a qualidade do ar a favor do vento (Abhijith e Kumar, 2019).

Figura 5 – Descrição simples das condições dos espaços de ruas abertas e fluxo de poluição

Fonte: Adaptado pelos autores de Kumar, Abhijith, Barwise (2019).

Quadro 2 – Recomendações gerais para diferentes razões de aspectos de ruas abertas

Parâmetro de projeto	Considerações
Localização	As cercas vivas devem ser plantadas entre a rua e as calçadas ou edificações e na frente de árvores (se houver); esta configuração oferece redução máxima de exposição.
Espaçamento	Barreiras sem lacunas proporcionam melhor redução da exposição a favor do vento.
Altura	Sempre que possível, recomenda-se que a barreira de cercas vivas ou de parede verde tenham uma altura de 5m ou mais. Barreiras vegetativas com maior altura resultam em maiores reduções das concentrações dos poluentes do ar próximos ao pedestre. Recomenda-se uma altura mínima de 1,50 m.
Espessura	A vegetação deve ser a mais densa possível; barreiras de vegetação mais espessas oferecem maior redução de exposição. Se possível, recomenda-se uma espessura superior a 5,00 m.
Densidade	Barreiras de vegetação de alta densidade são geralmente melhores para reduzir os níveis de exposição a favor do vento.

Fonte: Adaptado pelos autores de Kumar, Abhijith, Barwise (2019).

RECOMENDAÇÕES GERAIS PARA AS TIPOLOGIAS

Todas as escalas de infraestrutura verde utilizam as árvores como principal elemento vegetativo capaz de melhorar a qualidade ambiental. A arborização de áreas públicas em jardins, ruas, praças, parques, orlas urbanas e unidades de conservação, requerem zelo em razão da manutenção periódica, tanto por parte do poder público quanto por parte de munícipes empenhados.

As cercas vivas frequentemente utilizadas em jardins de chuva, biovaletas, caminhos verdes e viários de uso múltiplo, consistem em espécies arbustivas mescladas conjuntamente às árvores para criação de barreiras vegetativas. A implantação em canteiros urbanos deve considerar dimensões oportunas conforme diretrizes municipais de arborização para espaços viários.

Paredes e telhados verdes oferecem maior versatilidade para serem utilizados em edificações e diversas infraestruturas cinzas urbanas. A cidade de São Paulo, por exemplo, detém experiência desses elementos em empenas cegas de edifícios, como também em taludes ajardinados nas vias de tráfego intenso. As paredes verdes são estruturas verticais que apresentam

vegetação fixadas às superfícies por meio de mecanismos autoaderentes, e também plantas lenhosas autossustentáveis.

Os telhados verdes são constituídos por uma camada fina de substrato que acomoda a vegetação em coberturas horizontais de um edifício.

A QUOTA AMBIENTAL, UMA POLÍTICA PÚBLICA INOVADORA PARA AMPLIAR INFRAESTRUTURA VERDE

As infraestruturas verdes consistem de possibilidades inovadoras de gestão ambiental para enfrentar os complexos problemas associados à massiva urbanização contemporânea, permitindo possibilidades de múltiplos ganhos como na forma de serviços ambientais, melhoria da qualidade de vida nas cidades, mitigação e adaptação às mudanças climáticas e, também, como já afirmado, mitigação da poluição atmosférica (Andersson et al., 2019; Staddon et al., 2018).

No contexto da busca de estratégias inovadoras para o emprego e promoção de infraestrutura verde urbana dirigida aos problemas associados à poluição atmosférica, destacamos a relevante experiência de política pública implementada no município de São Paulo, dentro do que foi denominado como Quota Ambiental. Ressaltamos aqui alguns princípios e atributos desta política tendo como referência o artigo de Caetano et al. (2021), que também se dedica a descrever o processo de formulação da respectiva agenda política.

No ano de 2013, a prefeitura da cidade de São Paulo iniciou processo de mobilização no sentido de incorporar aspectos ambientais no processo de licenciamento urbano de empreendimentos imobiliários urbanos. Para ultrapassar conceitos relacionados simplesmente com a impermeabilização do solo – que já eram vigentes e da mesma forma relevantes em inúmeras cidades brasileiras dado à condição de elevada pluviosidade e adensamento urbano –, a proposta inovadora que se constituiu embasou-se em ampla gama de princípios associados aos serviços ambientais e à consideração de que as áreas verdes nesta cidade estão desigualmente distribuídas.

Dessa forma, culminou em 2016 a implementação da Quota Ambiental enquanto componente da Lei nº 16.402 (São Paulo, 2016), que disciplina o parcelamento, o uso e a ocupação do solo no Município de São Paulo. Os princípios orientadores da Quota Ambiental referem-se à flexibilidade ao proporcionar possibilidades a projetista de edificações, considerar desigualdades na distribuição de infraestruturas verdes na cidade e, também, ter uma base teórica sólida – o que foi constituído sobretudo a

partir da pesquisa de doutorado de Paulo Mantey Domingues Caetano na Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo (Caetano, 2016).

A Quota Ambiental agrega um sofisticado mecanismo que incorpora condicionantes ecológicos às construções, promovendo benefícios ambientais associados ao microclima, biodiversidade, drenagem urbana e qualidade ambiental associadas ao verde urbano. Em termos práticos, consiste do cálculo envolvendo um indicador de cobertura vegetal e um de drenagem, ambos calculados a partir de quadro de referência da lei, onde o projetista proponente da obra deve atingir uma pontuação mínima de valor contemplando, portanto, importantes atributos ambientais no lote. Este mecanismo se aplica a construções novas no município em lotes com metragem igual ou superior a 500m². Um ponto interessante na implementação deste mecanismo, refere-se ao compromisso reparador, considerando que o cálculo das pontuações mínimas é mais exigente para regiões da cidade, onde há menor presença de áreas verdes. Em sua aplicação, a flexibilidade se constitui uma vez que distintos atributos permitem pontuar sobre os indicadores almejados, por exemplo, fazendo-se uso de áreas não impermeabilizadas, vegetação de distintos estratos, utilização de telhados verdes e paredes verdes.

Considera-se que a Quota Ambiental apresenta inovação ao permitir o provimento de serviços ambientais importantíssimos a partir de lotes públicos ou privados, conferindo condicionantes ecológicos de grande interesse coletivo que podem, inclusive, contribuir com a melhoria da qualidade do ar em grandes cidades. Com isso, refletimos sobre o potencial de replicabilidade e de aprimoramento deste mecanismo, que pode ser associado de maneira mais enfática com o planejamento urbano voltado às condições de saúde pública. Digamos que a Quota Ambiental, ou a aplicação em similaridade de suas premissas, pode se dirigir mais especificamente a áreas de maior interesse por oferecerem condições propícias a piores índices de qualidade do ar.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As diretrizes demonstram que os elementos da vegetação urbana, como árvores, cercas vivas, parques urbanos, paredes e telhados verdes, são fundamentais para a qualidade de vida humana, aspectos socioeconômicos e prestação dos serviços ecossistêmicos. Entretanto, quando aplicados de maneira inadequada podem causar desvantagens em relação à qualidade do ar. A inserção equivocada e o plantio de espécies exóticas

podem prejudicar a dispersão e deposição de poluentes, além das emissões de COVBs e pólenes.

Em cânions de ruas profundas é comum o uso de árvores de grande porte, porém essa barreira vegetativa cria um impacto negativo na qualidade do ar. Por outro lado, a combinação entre árvores e cercas vivas proporciona uma barreira completa e impede o fluxo de ar, por baixo e por cima, em cânions de ruas largas, protegendo o pedestre das fontes veiculares.

Em ruas abertas, barreiras vegetativas têm um efeito positivo por apresentarem espessura, altura e maior densidade. Espécies perenes e arbustos nativos podem criar condições favoráveis para a mitigação de poluição do ar em ruas abertas.

Poucos são os estudos relacionados às melhorias atmosféricas voltadas aos telhados e paredes verdes. Observa-se que expressam uma capacidade menor do que as árvores e cercas vivas para remover os poluentes. Por outro lado, exigem menor espaço e se adaptam às infraestruturas cinzas dos espaços urbanos, como taludes, viadutos e muros de contenção.

A conexão de espaços verdes em centros urbanos contribui potencialmente para gerar benefícios à saúde humana e ao bem-estar, reduzindo o risco de doenças crônicas, estresse, depressão, problemas cardiovasculares, mortes prematuras, além de ofertarem diversos serviços ecossistêmicos. Contudo, novos estudos ligados à área da saúde podem auxiliar questões práticas aplicadas à redução da poluição atmosférica, por meio da vegetação urbana. O avanço do conhecimento favorece a relação entre espécies nativas dos biomas brasileiros, estratos vegetativos e mecanismos de dispersão, deposição, pólenes e redução de COVBs. A educação ambiental possibilitará uma sensibilização de pessoas por meio do nexo entre poluição do ar, saúde humana e infraestrutura verde às dinâmicas urbanas de planejamento territorial e tomada de decisões (Kumar et al., 2019). Dessa forma, o avanço de pesquisas nessa linha é importante para dar suporte aos serviços comunitários, educação integrada às questões socioambientais, orientações e promoção de políticas públicas voltadas à implantação de infraestrutura verde para mitigação da poluição do ar.

As estratégias apresentadas dialogam com todos os setores interessados: poder público, sociedade civil organizada e setor empresarial. O desenvolvimento de ações é necessário para reduzir as emissões e restringir os impactos socioambientais e econômicos. A publicação de informações em veículos de comunicação, diálogos em espaços educativos e experiências cotidianas auxiliarão o desenvolvimento da educação socioambiental em benefício da sensibilização comunitária e mudança de comportamentos, como atividades físicas ao ar livre, uso de transportes públicos coletivos,

preparação de alimentos orgânicos, preservação de polinizadores, redução de taxas sobre o valor do imóvel, entre outros.

Diante do problema da poluição atmosférica urbana, da importância da infraestrutura verde, das conformações com os cânions urbanos que são de maior risco, podem ser adotadas medidas de gestão urbana por meio do licenciamento edilício visto que a experiência correlata da quota ambiental no município de São Paulo abrange tipologias de infraestrutura verde, como arborização urbana, cercas vivas, paredes e telhados verdes, que propõem atributos de serviços ecológicos para composição do fator de incentivo à qualificação ambiental, resultando em escolhas condizentes à inserção do lote urbano, à valorização do bem-estar humano, além da relação entre ambientes construídos e a qualidade do ar em espaços abertos urbanos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) pelo apoio ao projeto Infraestrutura verde das cidades para resfriamento urbano – GreenCities (Processo Fapesp: 22/02365-5).

REFERÊNCIAS

- ABHIJITH, K. V. et al. Air Pollution Abatement Performances of Green Infrastructure in Open Road and Built-up Street Canyon Environments – A Review. *Atmospheric Environment*, v. 162, p. 71-86, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.014>
- ANDERSSON, E. et al. Enabling green and blue infrastructure to improve contributions to human well-being and equity in urban systems. *BioScience*, v. 69, n. 7, p. 566-574, 2019.
- ARBEX, M. A.; SANTOS, U. P.; MARTINS, L. C.; SALDIVA, P. H. N.; PEREIRA, L. A. A.; BRAGA, A. L. F. A poluição do ar e o sistema respiratório. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, v. 38, n. 5, p. 643-655, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1806-37132012000500015>
- BENEDICT, M. A.; MCMAHON, E. T. *Green infrastructure: linking landscapes and communities*. Washington: Island Press, 2006.
- CAETANO, P. M. D. *Fundamentação teórica da Quota Ambiental e estudo de*

caso de seu desenvolvimento em São Paulo. Tese (Doutorado em Saúde Ambiental) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

CAETANO, P. M. D. et al. The City of São Paulo's Environmental Quota: A Policy to Embrace Urban Environmental Services and Green Infrastructure Inequalities in the Global South. *Frontiers in Sustainable Cities*, v. 3, 2021. <https://doi.org/10.3389/frsc.2021.685875>

CAICHE, D. T.; PERES, R. B.; SCHENK, L. B. M. Floresta urbana, soluções baseadas na natureza e paisagem: planejamento e projeto na cidade de São Carlos (SP). *Revista Labverde*, v. 11, n. 1, p. 121-149, 2021. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-2275.labverde.2021.189316>

CARVALHO, C. H. R. *Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros*. Texto para discussão. Brasília: Ipea, 2011. 39 p. Disponível em: https://portalantigo.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_1606.pdf. Acesso em: 13 dez. 2023.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Ficha de informação toxicológica do monóxido de carbono*. São Paulo: Cetesb, 2010. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/Monoxido-de-Carbono.pdf> Acesso em: 03 jul. 2023.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Efeitos da poluição*. São Paulo: Cetesb, [2021]. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/solo/efeitos-da-poluicao/> Acesso em: 25 jun. 2023.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Qualidade do ar no Estado de São Paulo 2021*. 1ª ed. São Paulo: Cetesb, 2022. 161 p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2022/10/Relatorio-de-Qualidade-do-Ar-no-Estado-de-Sao-Paulo-2021.pdf> Acesso em: 21 jun. 2023.

EEA – EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. Report n. 05/2022. *Air quality in Europe 2022*. <https://doi.org/10.2800/488115>

EEA – EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. *How air pollution affects our health*. 23 mai. 2023. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/air-pollution/eow-it-affects-our-health> Acesso em: 03 jul. 2023.

FLOSS, M.; ZANDAVALLI, R. B.; LEÃO, J. R. B.; LIMA, C. V.; VIANNA, N.; BARROS, E. F.; SALDIVA, P. H. N. Poluição do Ar: uma revisão de

escopo para recomendações clínicas para a medicina de família e comunidade. *Revista Brasileira Medicina de Família e Comunidade*, v. 17, n. 44, p. 3038, 2022. [https://doi.org/10.5712/rbmfc17\(44\)3038](https://doi.org/10.5712/rbmfc17(44)3038)

HONGSHENG, X.; YUAN, C.; JIAFENG, L.; YICHEN, L.; ROBERTS, N.; ZHIYUN, J. Affective disorder and brain alterations in children and adolescents exposed to outdoor air pollution. *Journal of Affective Disorders*, v. 331, p. 413-424, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2023.03.082>

ISCAPE – IMPROVING THE SMART CONTROL OF AIR POLLUTION IN EUROPE. Improving air quality and climate with green infrastructure. *Policy Brief*, n. 6, nov. 2019. Disponível em: https://www.iscapeproject.eu/wp-content/uploads/2020/01/iSCAPE_Policy_Brief_No6_Improving-air-quality-and-climate-with-green-infrastructure.pdf Acesso em: 24 jun. 2023.

JANHÄLL, S. Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*, v. 105, p. 130-137, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.052>

KEYES, T. et al. Low cost PM_{2.5} sensors can help identify driving factors of poor air quality and benefit communities. *Heliyon*, v. 9, n. 9, e19876, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19876>

KUMAR, P.; ABHIJITH, K. V.; BARWISE, Y. *Implementing Green Infrastructure for Air Pollution Abatement: General Recommendations for Management and Plant Species Selection*. United Kingdom: University of Surrey, August 2019. Disponível em: <https://openresearch.surrey.ac.uk/esploro/outputs/99511017702346> Acesso em: 15 jun. 2023.

KUMAR, P.; DRUCKMAN, A.; GALLAGHER, J.; GATERSLEBEN, B.; ALLISON, S.; et al. The nexus between air pollution, green infrastructure and human health. *Environment International*, v. 133, part A, 105181, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105181>

LIU, Y. et al. Short-term exposure to ambient air pollution and asthma mortality. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, v. 200, 30871339, 2019. <https://doi.org/10.1164/rccm.201810-1823OC>

LOCOSSELLI, G. M. Soluções Baseadas na Natureza para redução da poluição do ar na cidade. In: GÜNTHER, W. R.; PHILIPPI JR., A. (Org.). *Planejamento urbano e políticas ambientais: métodos, instrumentos e experiências*. São Paulo: Faculdade de Saúde Pública da USP, 2020. p. 86-106.

MALHEIROS, T. *Relatório sobre poluição atmosférica de São Carlos*. Escola de

Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. 92 p. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/258782/mod_resource/content/0/Modelo%20de%20Relat%C3%B3rio.pdf Acesso em: 13 dez. 2023.

MANISALIDIS, I.; STAVROPOULOU, E.; STAVROPOULOS, A.; BEZIRTZOGLU, E. Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health*, v. 8, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>

MOCELIN, H. T.; FISCHER, G. B.; BUSH, A. Adverse early-life environmental exposures and their repercussions on adult respiratory health. *Jornal de Pediatria*, v. 98, Supplement 1, p. S86-S95, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jped.2021.11.005>

NOVAES, H. M. D.; GOUVEIA, N.; MEDEIROS, A. P. P. de. Mortalidade perinatal e poluição do ar gerada por veículos. *Revista Brasileira de Ginecologia e Obstetrícia*, v. 32, n. 10, p. 471-475, 2010.

NOWAK, D. J.; VAN DEN BOSCH, M. Tree and forest effects on air quality and human health in and around urban areas. *Santé Publique*, v. 31, p. 153-161, HS1 (S1), 2019. <https://doi.org/10.3917/spub.190.0153>

PAUL, K. C.; HAAN, M.; YU, Y.; INOUE, K.; MAYEDA, E. R.; DANG, K.; WU, J.; JERRETT, M.; RITZ, B. Traffic-Related Air Pollution and Incident Dementia: Direct and Indirect Pathways Through Metabolic Dysfunction. *Journal of Alzheimer's Disease*, v. 76, n. 4, p. 1477-1491, 2020. <https://doi.org/10.3233/JAD-200320>

RIBEIRO, M. E. J. *Infraestrutura verde: uma estratégia de conexão entre pessoas e lugares. Por um planejamento urbano ecológico para Goiânia*. 2010. Tese (Doutorado em Paisagem e Ambiente) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. <https://doi.org/10.11606/T.16.2010.tde-31052010-150556>

RISTORINI, M.; BALDACCHINI, C.; MASSIMI, L.; SGRIGNA, G.; CALFAPIETRA, C. Innovative Characterization of Particulate Matter Deposited on Urban Vegetation Leaves through the Application of a Chemical Fractionation Procedure. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 16, p. 5717, 2020. <https://doi.org/10.3390/ijerph17165717>

SANTOS, U. P. et al. Environmental air pollution: respiratory effects. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, v. 47, n. 1, e20200267, 2021. <https://doi.org/10.36416/1806-3756/e20200267>

SÃO PAULO (Estado). *Meio ambiente paulista: relatório de qualidade ambiental 2022*. Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente, Coordenadoria de Planejamento Ambiental, 1ª ed. São Paulo: Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente, 2022.

SÃO PAULO (Município). *Lei 16.402, de 22 de março de 2016*. Disciplina o parcelamento, o uso e a ocupação do solo no Município de São Paulo, de acordo com a Lei nº 16.050, de 31 de julho de 2014 – Plano Diretor Estratégico (PDE).

SOFIA, D.; GIOIELLA, F.; LOTRECCHIANO, N.; GIULIANO, A. Mitigation strategies for reducing air pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, p. 19226-19235, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08647-x>

SOLERA, M. L.; MACHADO, A. R.; CAVANI, A. C. M.; SOUZA, C. A.; LONGO, M. H. C.; VELASCO, G. Del N.; IKEMATSU, P.; AMARAL, R. D. A. M. (Orgs). *Guia Metodológico para Implantação de Infraestrutura Verde*. São Paulo: FIPT, 2020.

STADDON, C. et al. Contributions of green infrastructure to enhancing urban resilience. *Environment Systems and Decisions*, v. 38, n. 3, p. 330-338, 2018.

TIWARI, A.; KUMAR, P.; BALDAUF, R.; ZHANG, K. M.; PILLA, F.; DI SABATINO, S.; BRATTICH, E.; PULVIRENTI, B. Considerations for evaluating green infrastructure impacts in microscale and macroscale air pollution dispersion models. *Science of The Total Environment*, v. 672, p. 410-426, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.350>

TOLFFO, F.; GIATTI, L. L. A contribuição das áreas verdes e parques para a saúde ambiental das cidades. In: GÜNTHER, W. R.; DI GIULIO, G. M. (Org.). *Ambiente urbano e sustentabilidade: desafios e oportunidades*. São Paulo: Faculdade de Saúde Pública da USP, 2021. p. 02-26.

TOMSON, M.; KUMAR, P.; BARWISE, Y.; PEREZ, P.; FOREHEAD, H.; FRENCH, K.; MORAWSKA, L.; WATSS, J. F. Green infrastructure for air quality improvement in street canyons. *Environment International*, v. 146, n. 106288, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106288>

UN-HABITAT – UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME. *Envisioning Future Cities: World Cities Report 2022*. Geneva: United Nations, 2022. Disponível em: <https://unhabitat.org/wcr/> Acesso em: 23 abr. 2023.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Air quality and health*. Geneva: WHO, 31 mar. 2021a. Disponível em: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts> Acesso em: 03 jul. 2023.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2,5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneva: WHO, 22 set. 2021b. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1371692/retrieve> Acesso em: 10 mar. 2024.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Ambient (outdoor) air pollution*. Geneva: WHO, 19 dez. 2022. Disponível em: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) Acesso em: 26 jun. 2023.