EARLY CHILDHOOD SCIENTIFIC COUNCIL ON EQUITY AND THE ENVIRONMENT

A qualidade do ar afeta o desenvolvimento e a saúde na primeira infância

WORKING PAPER 3

Tradução: *Melissa Harkin, CT e Tuca Martins*

Center on the Developing Child
HARVARD UNIVERSITY

EARLY CHILDHOOD SCIENTIFIC COUNCIL ON EQUITY AND THE ENVIRONMENT

PATROCINADORES

Pessoa anônima

The Ballmer Group

Buffett Early Childhood Fund

Conrad N. Hilton Foundation

Esther A. and Joseph Klingenstein Fund, Inc.

George B. Storer Foundation

Imaginable Futures

J.B. and M.K. Pritzker Family Foundation

Tikun Olam Foundation

William S. Benjamin e Kerri Benjamin

MEMBROS

Lindsey Burghardt, MD, MPH, FAAP, Diretora
Diretora Científica, Center on the Developing Child, Universidade Harvard

Nathaniel Harnett, PhD
Diretor do Laboratório de Neurobiologia de Experiências Afetivas e Traumáticas, McLean Hospital; Professor Assistente de Psiquiatria, Escola de Medicina de Harvard

Nat Kendall-Taylor, PhD
Diretor-presidente, Instituto FrameWorks

Alison G. Lee, MD, MS
Professora Associada de Medicina, Chefe Associada da Divisão de Pneumologia, Cuidados Críticos e Medicina do Sono no Departamento de Medicina, Escola Icahn de Medicina em Mount Sinai, Presidente do Comitê de Políticas de Saúde Ambiental da American Thoracic Society (ATS)

Kari Nadeau, MD, PhD
Presidente do Departamento de Saúde Ambiental da Escola de Saúde Pública T.H. Chan de Harvard e Professora de Estudos Climáticos e Populacionais da John Rock

Devon Payne-Sturges, DrPH
Professora do Departamento de Ciências de Saúde Ambiental da Universidade de Michigan, Escola de Saúde Pública

Natalie Slopen, ScD
Professora Associada do departamento de Ciências Sociais e Comportamentais, Escola de Saúde Pública T.H. Chan de Harvard

AUTORES ADICIONAIS

Joseph G. Allen, DSc, MPH
Professor Associado da Escola de Saúde Pública T.H. Chan de Harvard

Rebecca Hansen, MFA
Diretora Sênior de Comunicações, Center on the Developing Child, Universidade Harvard

Al Race
Membro Sênior, Center on the Developing Child, Universidade Harvard

Joseph Wilson, Jr., MHS
Escola de Saúde Pública T.H. Chan de Harvard

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos seguintes membros da equipe do Center on the Developing Child, que apoiam o trabalho do ECSCEE de várias maneiras e foram fundamentais para a produção e publicação deste artigo e dos materiais relacionados:

Russell Apotheker, Diretor Assistente de Serviços Web

Amelia Johnson, Líder de Comunicações

Theresa Kennelly Mooney, Diretora Assistente de Comunicações

Anna Williams Sjörs, Redatora de Conteúdo Sênior

Sobre os autores
O Early Childhood Scientific Council on Equity and the Environment (Conselho Científico sobre Equidade e Meio Ambiente na Primeira Infância), sediado no Center on the Developing Child da Universidade Harvard, é uma colaboração multidisciplinar e interorganizacional comprometida a aprimorar nossa compreensão de como as influências do ambiente mais amplo afetam o desenvolvimento da primeira infância. Estabelecido em 2023, o Conselho visa alavancar as perspectivas científicas e informadas pela comunidade para ajudar os formuladores de políticas e líderes de diversos setores a entender e se mobilizar em torno de um enfoque no pré-natal e primeira infância fundamentada na busca pela equidade de oportunidades para todas as crianças, com atenção especial às comunidades de cor e às pessoas que vivem na pobreza. Para obter mais informações, acesse www.developingchild.harvard.edu.

Observação: o conteúdo deste artigo é de responsabilidade exclusiva dos autores e não representa necessariamente as opiniões dos patrocinadores.

Declaração sobre linguagem inclusiva
O Center on the Developing Child da Universidade de Harvard (incluindo professores, funcionários e afiliados) avaliou cuidadosamente todos os termos relacionados à identidade usados nesta publicação da forma mais abrangente possível no momento de sua produção. Entendemos que a expressão da identidade e a linguagem evoluem com o tempo e que diferentes perspectivas e culturas podem resultar em diferentes entendimentos desses termos. Não buscamos negar a validade de outras definições por meio do uso de termos específicos. Conforme nosso conhecimento, todos os termos relacionados à identidade usados são a interpretação mais inclusiva dessas palavras. Respeitamos o direito de todos de nomear e expressar suas identidades por si mesmos.

Ao citar e referenciar fontes diretamente, a terminologia da fonte permanece inalterada para maior clareza, embora reconheçamos a existência de termos mais inclusivos na contemporaneidade. Apesar das diferenças terminológicas, as informações da fonte permanecem pertinentes e aplicáveis.

Citação sugerida: Early Childhood Scientific Council on Equity and the Environment. (2025). A qualidade do ar afeta o desenvolvimento e a saúde na primeira infância: Working Paper 3. Retirado de www.developingchild.harvard.edu

© 2025, EARLY CHILDHOOD SCIENTIFIC COUNCIL ON EQUITY AND THE ENVIRONMENT, CENTER ON THE DEVELOPING CHILD DA UNIVERSIDADE DE HARVARD

A poluição do ar afeta a todos nós

Este artigo é o terceiro de uma série que tem como foco as formas como as condições nos ambientes de desenvolvimento moldam a saúde e o bem-estar das crianças pequenas. A qualidade do ar é apenas um componente de um conjunto de condições inter-relacionadas que afetam o desenvolvimento do corpo e do cérebro das crianças. Este documento apresenta um resumo do conhecimento atual sobre o impacto da qualidade do ar, particularmente da qualidade do ar interno, nos sistemas biológicos em desenvolvimento.

Desde antes do nascimento, a saúde e o desenvolvimento das crianças são fortemente afetados pelas influências de seu ambiente de desenvolvimento — toda a gama de experiências e exposições que elas têm nos lugares em que vivem, crescem, brincam e aprendem — com implicações para sua saúde e bem-estar ao longo da vida. Todas essas influências, positivas e negativas, interagem para moldar o desenvolvimento do cérebro de uma criança, os sistemas integrados em seu corpo — incluindo os sistemas imunológico, metabólico e cardiovascular — e até mesmo como seus genes são expressos.[1] O ar limpo é uma parte essencial de um ambiente de desenvolvimento saudável e garante que todos nós tenhamos ar limpo para respirar em todos os ambientes onde passamos o tempo — sejam eles internos ou externos — e oferece uma oportunidade vital para apoiar o desenvolvimento saudável das crianças.[2]

A redução da poluição do ar externo nos Estados Unidos foi, até recentemente, uma grande história de sucesso. A Lei do Ar Limpo de 1970 (com grandes atualizações em 1977 e 1990 em resposta a novos dados) reduziu a poluição do ar externo de uma variedade de fontes em mais de 70% e economizou trilhões de dólares em custos de saúde, mesmo quando a população, a economia e o número de carros continuaram a crescer substancialmente.[3] Até 2020, estima-se que a Lei tenha evitado 2,4 milhões de dias de piora dos sintomas de asma, 120.000 atendimentos de emergência, 5,4 milhões de dias letivos perdidos, 200.000 ataques cardíacos e mais de 230.000 mortes prematuras.[4] Mais recentemente, no entanto, a fumaça de incêndios florestais alimentada pelo calor excessivo e pela seca causada pelas mudanças climáticas aumentou alguns tipos de poluentes do ar, causando uma deterioração significativa na qualidade do ar em quase três quartos do território contíguo dos EUA — apagando efetivamente quatro anos de progresso da qualidade do ar na redução desses poluentes.[5]

A importância da qualidade do ar externo para a saúde é reconhecida há muito tempo. No entanto, a maioria dos adultos passa mais de 90% do tempo fechada em edifícios e veículos.[6] Durante a gravidez e a primeira infância, é provável que seja ainda mais[7] — em creches, escolas, centros comunitários, edifícios de acampamentos de verão, escritórios, carros e casas. Em todos esses lugares, o ar contém uma ampla gama de partículas e produtos químicos, alguns dos quais têm a capacidade de afetar negativamente o desenvolvimento e a saúde das crianças. Além disso, a Agência de Proteção Ambiental (EPA, na sigla em inglês) estima que os níveis de poluentes do ar interno podem ser de duas a cinco vezes maiores do que os níveis nos ambientes externos devido à má ventilação; produtos químicos liberados de móveis, tapetes e produtos de limpeza; fontes internas de poluição, como subprodutos do uso de fogões a gás; fumaça de tabaco; e entrada de poluição externa.[8,9]

Embora muitos fatores contribuam para a quantidade de poluição do ambiente

externo que vão para o ambiente interno — "vazando" para edifícios com paredes, janelas e portas mal vedadas a filtros de ar-condicionado ausentes ou de baixa qualidade — em média, cerca de metade do que está no ar do lado de fora entra. E, como normalmente passamos mais de 21 horas dentro do ambiente interno todos os dias, a maior parte de nossa exposição à poluição do ar externo ocorre, na verdade, no ambiente interno.[10]

Quando se trata de qualidade do ar, nosso próprio ar interno mudou significativamente nos últimos 50 anos. Móveis de madeira composta, tapetes sintéticos, pisos poliméricos, tecidos e aditivos retardadores de chama, almofadas de espuma, "produtos químicos eternos" conhecidos como PFAS, na sigla em inglês, e produtos de limpeza perfumados (por exemplo, produtos de higiene pessoal, agentes de limpeza, sabão em pó e amaciantes) tornaram-se quase onipresentes em ambientes internos, transportando pelo ar uma série de produtos químicos conhecidos como "compostos orgânicos voláteis" (COVs).[11,12] As concentrações de COVs, muitos dos quais são conhecidos por causar câncer, podem ser cem vezes maiores em ambientes internos do que nos externos.[13]

A maioria dos adultos passa mais de 90% do tempo fechada em edifícios e veículos. Durante a gravidez e a primeira infância, é provável que seja ainda mais — em creches, escolas, centros comunitários, edifícios de acampamentos de verão, escritórios, carros e casas.

Esses compostos são emitidos como gases de inúmeros produtos e materiais domésticos, incluindo os mencionados já mencionados, bem como emissões de veículos ou de garagens anexas que podem penetrar nos edifícios.[9] Como um exemplo dos danos conhecidos dos COVs, estudos associam o uso frequente de produtos de limpeza durante a infância e a gravidez — particularmente produtos de spray perfumado — com maior risco de sibilância na primeira infância e o desenvolvimento de asma e infecções do trato respiratório inferior na infância.[14] Além disso, evidências sugerem que a exposição a COVs em produtos de limpeza durante a pré-concepção e gravidez está associada a um risco aumentado de asma em crianças, e a exposição ocupacional a esses compostos tem sido associada a maiores taxas de câncer de pulmão e mortalidade cardiovascular.[14,15]

Já existem soluções viáveis para melhorar a qualidade do ar interno. Estas variam de opções de políticas e regulamentos a produtos de limpeza sem poluentes, materiais mais saudáveis para habitação e móveis e novas tecnologias de construção, bem como simplesmente manter e usar sistemas de ventilação com filtros de alta qualidade. No entanto, essas soluções não foram amplamente adotadas. E todos os poluentes descritos afetam desproporcionalmente famílias com menos recursos e famílias negras porque políticas discriminatórias de zoneamento, empréstimos e habitação deixaram muitas comunidades de baixa renda e minorizadas vivendo em moradias superlotadas, construídas com materiais de baixa qualidade e muitas vezes situadas perto de ruas congestionadas e poluição industrial.[16,17] As estratégias de solução devem priorizar as comunidades marginalizadas enquanto trabalhamos para melhorar a qualidade do ar nos ambientes onde passamos a maior parte do tempo durante a gravidez e a primeira infância.

A poluição do ar interno afeta de forma particularmente intensa bebês e crianças pequenas

Não só os bebês e as crianças pequenas são expostos a mais poluentes do ar interno, mas também são mais afetados por essa poluição do que a maioria dos adultos porque respiram mais rapidamente, inalam um volume maior de ar em relação ao tamanho do corpo e seus sistemas respiratório, reprodutivo, endócrino, imunológico, digestivo e neurológico ainda estão em desenvolvimento.[18] O outro lado dessa maior sensibilidade é a poderosa oportunidade que ela oferece para apoiar o desenvolvimento saudável, melhorando a qualidade do ar interno durante a gravidez e a primeira infância. Durante a gravidez, as alterações hormonais e físicas levam a um aumento na quantidade de ar inspirado e expirado.[19] Quando partículas microscópicas transportadas pelo ar e produtos químicos, como retardantes de chama ou PFAS, são inalados, eles entram nos pulmões, depois na corrente sanguínea, por meio da qual podem atravessar a placenta e alcançar o feto, onde os pulmões, o cérebro e os sistemas reprodutivo, imunológico e endócrino estão passando por um rápido desenvolvimento, sendo especialmente sensíveis a essas exposições.[20]

Durante o desenvolvimento inicial, os sistemas do corpo "leem" o ambiente ao seu redor e se adaptam ao que experimentam. Por exemplo, se um bebê sofre exposição significativa ou prolongada a contaminantes no ar, isso pode desencadear uma sucessão de consequências. Os sistemas imunológico e inflamatório respondem de forma protetora, ativando

> **Durante a gravidez, mudanças hormonais e físicas levam a um aumento na quantidade de ar inspirado e expirado.**

células e proteínas que podem causar alterações na estrutura dos pulmões, produção excessiva de muco e formação de tecido cicatricial perto das vias aéreas. Essas mudanças podem estabelecer as bases para o desenvolvimento da asma durante a infância.[21] No curto prazo, adaptações biológicas, como essas reações do sistema imunológico e inflamatório, são saudáveis e ajudam os nossos corpos a responder ao ambiente — sem essa resposta imunológica de curto prazo, não poderíamos sobreviver. Mas, se as condições forem prolongadas ou extremas, algumas adaptações de curto prazo podem se tornar prejudiciais a longo prazo pela superativação de sistemas que deveriam ser ativados temporariamente.[1]

Nunca é tarde demais: o poder da plasticidade do desenvolvimento

Embora as consequências da exposição a partículas e produtos químicos no ar durante a gravidez e a primeira infância possam ser terríveis, elas não são inevitáveis. Os sistemas biológicos do corpo humano — do cérebro aos sistemas imunológico, cardiovascular e metabólico — têm uma poderosa capacidade de se adaptar ao longo da vida em resposta às influências do meio ambiente. Os cientistas chamam isso de "plasticidade do desenvolvimento" e, embora o corpo seja mais plástico nos primeiros anos, ele nunca perde a capacidade de se adaptar.[1] Todo resultado do desenvolvimento é o resultado de uma interação entre genes, exposições e experiências, e o momento dessas exposições e experiências durante o desenvolvimento. Em outras palavras, os resultados de saúde para qualquer indivíduo exposto à poluição do ar dependem da natureza, duração, intensidade e tempo de sua exposição em combinação com as predisposições genéticas do indivíduo. Isso explica por que duas pessoas — inclusive gêmeos — podem ter a mesma exposição, mas uma pode não ser afetada enquanto a outra é gravemente afetada.[22] Todos os estudos citados neste relatório se referem ao aumento da probabilidade — mas não à inevitabilidade — de desfechos adversos após a exposição a substâncias tóxicas presentes no ar interno.

Com essa adaptabilidade em mente, é ainda mais importante que melhoremos a qualidade do ar que nos rodeia durante a gravidez e a primeira infância — um ar mais limpo é sempre benéfico, mesmo quando as crianças foram expostas a poluentes no passado.

Como a qualidade do ar interno afeta o desenvolvimento fetal e infantil

Conforme observado acima, existem muitas fontes de poluição do ar que se originam em ambientes internos. No entanto, sabendo que até metade do que está no ar do lado de fora também pode entrar, é fundamental considerar as pesquisas atuais sobre qualidade do ar e crianças com foco na poluição do ar no meio externo. Esses estudos e suas conclusões, muitos dos quais citamos abaixo, oferecem considerações importantes relacionadas à composição e aos efeitos do ar interno que nossas crianças respiram, bem como oportunidades para tornar esse ar mais limpo.

Resposta imune desequilibrada— Quando partículas, produtos químicos e alérgenos transportados pelo ar (por exemplo, esporos de mofo) passam pelos pulmões e entram no corpo, eles acionam a resposta do sistema imunológico. A inflamação, uma parte importante de nossa resposta imune, protege o corpo tanto das partículas físicas quanto dos componentes tóxicos absorvidos pelas partículas.[23] Mas

o excesso de inflamação por muito tempo, especialmente se ocorrer durante períodos altamente sensíveis, quando os órgãos e o cérebro ainda estão em desenvolvimento, pode enfraquecer o sistema imunológico e contribuir para condições inflamatórias ao longo da vida, como doenças cardíacas, diabetes e doenças autoimunes.[1] Outra parte da resposta imune é a liberação de moléculas de sinalização conhecidas como "espécies reativas de oxigênio", que normalmente são mantidos em equilíbrio por antioxidantes no corpo.[24] Muitas espécies reativas de oxigênio podem dominar o sistema de defesa antioxidante e causar danos às células.[25] Isso é conhecido como "estresse oxidativo", um sinal de que os sistemas do corpo estão desequilibrados, o que é especialmente problemático durante a gravidez, quando pode afetar a capacidade da placenta de funcionar como protetora e nutridora do desenvolvimento fetal.[26] O estresse oxidativo está ligado a inúmeras complicações na gravidez, incluindo pré-eclâmpsia, diabetes gestacional, crescimento fetal deficiente, aborto e natimorto.[25,26] Por exemplo, o formaldeído, um COV emitido por muitos móveis comuns e materiais de construção, bem como produtos de limpeza,[27] pode causar estresse oxidativo em células e tecidos fetais[28] e afetar adversamente os hormônios necessários para o crescimento fetal, o que pode explicar a relação entre a exposição ao formaldeído e bebês com baixo peso ao nascer.[19]

Expressão gênica alterada—Durante o desenvolvimento fetal, os genes determinam quais células desempenharão cada uma das funções críticas do corpo e carregam instruções sobre como as células farão seu trabalho. Mas as experiências e exposições de uma criança podem ativar proteínas que se ligam aos seus genes em padrões distintos, que controlam se e como as instruções de um gene serão realizadas. Esse processo epigenético, que pode levar a mudanças transmitidas de pais para filhos, afeta a proliferação, diferenciação e estabilidade de todas as células do corpo, incluindo as células cerebrais — e pode ser alterado por poluentes presentes no ar interno durante a gravidez e os primeiros anos de vida. As alterações epigenéticas resultantes podem afetar o desenvolvimento de órgãos, padrões de sono, níveis de energia e inflamação[20] — ou até mesmo causar alterações no DNA que aumentam o risco de autismo, atrasos no desenvolvimento e câncer.[20,29] Por exemplo, o carbono negro, uma minúscula partícula transportada pelo ar que pode ser emitida por incêndios florestais, motores a gás e diesel e usinas termoelétricas a carvão, pode atravessar a placenta e entrar no feto em desenvolvimento.[19] Quando as partículas de poluição do ar atravessam a placenta, elas podem causar alterações epigenéticas na forma como a placenta funciona, podendo levar a interrupções no desenvolvimento saudável do feto.[20] Por exemplo, a capacidade da placenta de reparar o DNA danificado no feto pode ser prejudicada, o que pode aumentar o risco de câncer mais tarde na vida.[20,23] Não se sabe quantas gerações esses tipos de alterações afetam — por exemplo, há evidências de que as alterações epigenéticas observadas em mães que foram expostas ao chumbo podem ser transmitidas não apenas para seus filhos, mas também para seus netos.[30]

Nascimento prematuro—Quando os sistemas imunológico e inflamatório respondem por um longo período de tempo durante a gravidez, isso tira energia do desenvolvimento fetal.[1] Isso pode explicar por que a exposição durante a gravidez a partículas e gases transportados pelo ar, como dióxido de nitrogênio (um ingrediente típico de escapamentos de automóveis e das chaminés das indústrias, que pode ir para dentro de casa) está associada a um risco aumentado de parto prematuro e baixo peso ao nascer, ambos fatores de risco para uma série de problemas de neurodesenvolvimento na infância e mais tarde na vida.[30] O parto prematuro, definido como aquele que ocorre antes de 37 semanas, assim como o nascimento com baixo peso, acarreta riscos

de curto e longo prazo, incluindo maior probabilidade de morte infantil, atrasos no desenvolvimento de habilidades cognitivas e motoras, problemas de visão e audição, diminuição da capacidade pulmonar e deficiências de desenvolvimento, como paralisia cerebral, bem como maior risco de doenças crônicas, como obesidade e diabetes.[26,31,32] O nascimento prematuro e o baixo peso ao nascer também estão ligados à redução da função pulmonar em bebês,[25] o que pode levar ao aumento do risco de asma na infância.[17] O tratamento das complicações do nascimento prematuro requer cuidados médicos, educação especial e serviços de intervenção precoce, com custos médios estimados de 65.000 dólares a mais por criança do que os custos de um nascimento a termo.[33] Podemos evitar esses custos — e promover de forma mais eficaz o desenvolvimento saudável — começando por evitar que esses poluentes entrem nos ambientes de desenvolvimento das crianças. Além das implicações já feitas para o nascimento prematuro, a exposição a contaminantes transmitidos por poeira, como retardantes de chama — retardantes ainda mais novos e "mais seguros" —, tem sido associada a maiores taxas de aborto espontâneo e menores taxas de fertilização e implantação de embriões em casais submetidos a fertilização in vitro.

Para começar, podemos promover o desenvolvimento saudável evitando que poluentes entrem nos ambientes de desenvolvimento das crianças.

Função pulmonar diminuída—O desenvolvimento pulmonar é um processo dinâmico que começa cedo durante o desenvolvimento pré-natal e continua durante toda a infância e no início da idade adulta.[23] Os pulmões podem ser afetados pela poluição do ar mesmo antes do nascimento.[26] Quando produtos químicos ou partículas transportadas pelo ar entram nos pulmões e na corrente sanguínea durante a gravidez, eles podem atravessar a placenta e alcançar o feto, onde podem influenciar a forma como as células pulmonares fetais se formam, o número e a qualidade dos vasos sanguíneos no pulmão e como os ramos do pulmão tomam forma, o que afeta o quão bem eles distribuem oxigênio para o resto do corpo.[20] A exposição à poluição do ar pode restringir a quantidade de oxigênio enviada ao feto por meio do sangue da placenta e pode fazer com que os pulmões se desenvolvam com uma menor capacidade de respirar.[33] A baixa função pulmonar no início da vida é, por si só, problemática, mas também pode levar a muitas formas de doença respiratória mais tarde, da asma à bronquite e à doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC).[26]

Desenvolvimento cerebral interrompido—As fases iniciais do desenvolvimento cerebral envolvem vários processos que são críticos para a função cerebral ao longo da vida. Os neurônios migram para sua localização final, começam a se conectar uns com os outros e otimizam as conexões mais utilizadas entre as células. Neste estágio inicial de desenvolvimento, a barreira protetora ao redor do cérebro ainda não se formou completamente, o que torna mais fácil para os poluentes se moverem através do sistema circulatório para o cérebro do que mais tarde na infância e na idade adulta, quando a barreira é menos permeável.[34] Mesmo em estágios posteriores do desenvolvimento, as partículas mais comuns transportadas pelo ar podem afetar o cérebro, entrando pelas vias nasais e atravessando a barreira protetora do sangue para o cérebro. As regiões do cérebro onde as células são mais afetadas incluem aquelas associadas à memória, ao aprendizado, à reatividade ao estresse e à regulação das emoções e do comportamento.[36] A inflamação causada pela exposição à poluição do ar no pré-natal e nos primeiros anos também pode danificar as células cerebrais e alterar a expressão gênica de maneiras que aumentam o risco de doenças cerebrais mais tarde na vida, incluindo Alzheimer e Parkinson.[29] Os retardadores de chama,

muitos dos quais podem migrar para o ar e para a poeira do ambiente interno, demonstraram atravessar facilmente a placenta para afetar o desenvolvimento por meio de efeitos negativos no sistema neurológico, na tireoide e no sistema reprodutivo do feto. [37,38]

No início da vida, distúrbios do desenvolvimento, como o transtorno do espectro autista (TEA), também foram ligados à exposição pré-natal a partículas do ar externo, particularmente em meninos. Esses estudos se concentram na exposição à poluição do ar externo, mas como grande parte do que começa no exterior entra para interior e permanece lá, é razoável supor que esses poluentes possam ter efeitos adversos semelhantes quando ocorrem no ambiente externo.[39-41] Esses resultados neurológicos podem ser o resultado do estresse oxidativo fetal que interrompe a diferenciação e a organização das células no cérebro em desenvolvimento, em combinação com uma predisposição genética para o distúrbio.[39] As evidências sugerem cada vez mais que a exposição a um tipo de poluição do ar conhecido como material particulado 2,5 (PM2,5, na sigla em inglês) durante períodos críticos do desenvolvimento fetal e da infância aumenta o risco de desenvolver TEA, mesmo quando as exposições ocorrem em níveis baixos.[42]

Desregulação endócrina—A exposição a certos produtos químicos no ar pode afetar o sistema endócrino do corpo, que é responsável pela regulação dos hormônios. Os produtos químicos encontrados em purificadores de ar, produtos de cuidados pessoais e materiais de construção podem imitar a atividade da tireoide, afetar o início da puberdade e potencialmente interromper as vias de desenvolvimento durante a gravidez e a primeira infância. Um estudo descobriu que a mistura de produtos químicos contidos na poeira do ambiente interno imitava a testosterona e o estrogênio, o que significa que mesmo a poeira do dia a dia pode ser hormonalmente ativa.[95]

Danos em todos os sistemas—Diferentes substâncias químicas transportadas pelo ar têm efeitos distintos nos sistemas e órgãos interconectados do corpo, incluindo os sistemas respiratório e cardiovascular, com possíveis efeitos no neurodesenvolvimento, reações alérgicas, risco de câncer e morte prematura.[12] Para citar um exemplo de como isso funciona, quando o benzeno — um COV tóxico encontrado no escapamento de automóveis, fumaça de tabaco, algumas colas e tintas, plásticos, corantes e detergentes — é inalado, ele faz com que as células parem de funcionar corretamente de várias maneiras. Ele pode danificar o sistema imunológico alterando os níveis de anticorpos no sangue e causando a perda de glóbulos brancos. O benzeno é tóxico para a formação de plaquetas e glóbulos vermelhos da medula óssea, o que pode levar à anemia.[43] Também pode alterar a expressão de vários genes e proteínas e pode interferir na capacidade do fígado de desintoxicar o sangue e outros fluidos corporais. Combinadas, essas alterações no gene, no sangue e no sistema imunológico podem criar as condições para a leucemia em crianças e adultos e também podem afetar os gânglios linfáticos, causando linfoma.[1,44] E como esses produtos químicos podem ter fontes internas e externas que chegam ao ambiente, os níveis de exposição podem ser multifacetados.

Efeitos multiplicadores desiguais—Sabemos que o ar interno de baixa qualidade pode ser mais prejudicial quando diferentes produtos químicos se combinam. Um estudo recente concluiu que a exposição a uma mistura de poluentes atmosféricos durante o desenvolvimento fetal estava associada ao mau funcionamento da memória e ao aumento dos problemas de atenção durante a infância.[34] Tão importante quanto isso é o possível efeito combinado da poluição do ar interno e fatores psicossociais, como depressão, exposição à violência e status econômico, que podem influenciar os níveis de estresse em adultos de referência e crianças.[23] Por exemplo, os efeitos

dos poluentes do ar interno podem ser exacerbados pelo estresse experimentado por crianças que vivem em ambientes desfavorecidos, porque o estresse também é uma causa significante de inflamação e estresse oxidativo.[45,46] Os bairros com menos recursos devido à falta de investimento (por exemplo, acesso limitado a cuidados de saúde e espaço verde seguro) e a maioria das fontes de estresse (por exemplo, pobreza, discriminação e falta de oportunidade) também mostram associações mais fortes entre TEA e exposição pré-natal a partículas no ar.[47] Outros estudos observaram que a combinação de poluentes com altos níveis de estresse psicossocial durante a gravidez — por exemplo, estresse significativo causado pela pobreza, racismo, doença mental, violência em casa ou na comunidade, ou desastres ambientais, como incêndios florestais, estão associados à hipertensão, parto prematuro e doenças respiratórias.[23,48] É provável que haja um efeito multiplicador quando o estresse e a poluição — ambos gatilhos conhecidos para a inflamação — se combinam para causar picos ainda maiores e mais duradouros na resposta inflamatória.[1,23] É importante entender isso, dada a forte ligação entre a inflamação e uma série de resultados adversos à saúde, incluindo condições como doenças cardíacas, depressão e câncer. Para garantir que todas as crianças possam prosperar em ambientes que apoiem seu bem-estar, é fundamental que priorizemos estratégias destinadas a diminuir o estresse psicossocial e lidar com a poluição do ar em comunidades que enfrentam as maiores desvantagens.

O que polui o ar interno

Com o tempo, as regulamentações reduziram com sucesso nossa exposição a poluentes internos, como monóxido de carbono, fumaça de tabaco e radônio, devido aos riscos significativos à saúde há muito estabelecidos. Muitas outras fontes de poluição do ar interno são menos conhecidas e permanecem não regulamentadas. Esses poluentes estão presentes no ambiente das crianças e podem causar sérios danos quando ocorre a exposição.

Compostos orgânicos voláteis (COVs) —Os COVs são liberados no ar a partir de muitos produtos domésticos comuns e materiais de construção. Os COVs podem se acumular na placenta e no feto, interromper a expressão gênica e o desenvolvimento de órgãos no nível celular e desencadear inflamação e estresse oxidativo. Eles estão associados a um risco aumentado de asma, irritações na pele e garganta e várias formas de câncer.[12,13] Já existem inúmeros produtos que usam químicos mais seguros (testados pelo serviço "Escolha Segura" da EPA) e solventes de base biológica de óleos cítricos, de sementes, vegetais e de pinho, mas os produtos que contêm produtos químicos perigosos permanecem não regulamentados e amplamente comercializados.[49] Os sprays, difusores elétricos e dispositivos suspensos rotulados de "purificadores de ar" não limpam o ar; eles adicionam fragrâncias a ele — e os produtos perfumados têm sido associados a uma série de efeitos adversos à saúde, como enxaquecas, ataques de asma, dificuldades respiratórias, problemas neurológicos, sintomas da mucosa e dermatite de contato.[14,50]

Pesticidas, ftalatos, produtos químicos eternos e retardadores de chama— A poeira em nossos ambientes internos

geralmente contém produtos químicos perigosos vindos de plásticos, produtos de limpeza, retardadores de chama, pesticidas, fragrâncias e produtos químicos eternos usados em alguns tecidos e revestimentos antiaderentes.[13] A poeira pode entrar em nossos corpos quando é levantada do chão e inalada.[95] A poeira também pode cair em nossa pele, permear nossa corrente sanguínea ou pode ser ingerida.[10] Dentro do corpo, esses produtos químicos podem imitar os hormônios por causa de sua estrutura química, levando a uma série de interrupções na função da tireoide e no desenvolvimento do sistema reprodutivo.

Material particulado (MP)—Partículas de tamanhos variados flutuam no ar, tanto no ambiente interno quanto no externo, com uma variedade de fontes, incluindo canteiros de obras, chaminés, incêndios florestais, cozimento e purificadores de ar em aerossol. Os pesquisadores categorizaram partículas de três tamanhos distintos (MP10, MP2,5 e partículas ultrafinas ou PUF), que podem entrar nos pulmões quando respiramos. A menor dessas partículas pode atravessar a corrente sanguínea e, em alguns casos, o cérebro, interrompendo o desenvolvimento cerebral fetal.[51] A exposição ao MP tem sido associada a uma série de efeitos adversos à saúde, que vão desde o aumento do risco de parto prematuro até a redução da função pulmonar e o agravamento da asma em crianças.[52]

Fumaça de incêndio florestal—Pode começar no ambiente externo, mas a fumaça do incêndio florestal também entra nos edifícios através de janelas abertas, rachaduras e fendas invisíveis nos edifícios e sistemas de ventilação de ar sem filtros de alta qualidade.[53] Essa é uma grande ameaça à saúde e ao desenvolvimento das crianças pequenas, que inclui uma mistura potente de partículas finas, carbono negro e produtos químicos, como monóxido de carbono e dióxido de nitrogênio.[25] A exposição à fumaça do incêndio florestal durante a gravidez e a primeira infância pode ter impacto negativo significativo nos partos saudáveis e nos efeitos de curto e longo prazo sobre as crianças pequenas, como aumento das taxas de ataques de asma, pneumonia e diminuição do desempenho escolar. Para obter mais informações sobre como a fumaça dos incêndios florestais afeta o desenvolvimento pré-natal e da primeira infância, consulte o relatório "Growing Up in a Warming World: How Wildfire Smoke Affects Early Childhood Development."("Crescer em um mundo em aquecimento: como a fumaça dos incêndios florestais afeta o desenvolvimento na primeira infância", em tradução livre).

Germes, vírus, bactérias, micróbios e alérgenos—Qualquer pai, professor, profissional de cuidados infantis ou prestador de cuidados pediátricos pode atestar a rápida disseminação de germes pelo ar entre as crianças, seja resfriado, gripe ou vírus respiratório sincicial (VRS). A pandemia de Covid-19 foi um lembrete vívido e global do papel da ventilação e dos filtros de alta qualidade na prevenção da propagação de vírus. Mofo e pragas domésticas, como baratas ou camundongos, e animais de estimação, todos liberam alérgenos microbianos que se juntam à poeira ou flutuam no ar e podem desencadear asma e outros sintomas respiratórios, bem como erupções cutâneas.[19]

Gases—A exposição a uma variedade de gases pode ter efeitos adversos nas pessoas que os inalam. Por exemplo, o ozônio é um gás produzido por reações químicas na atmosfera, particularmente quando aquecida. Devido ao nosso clima mais quente, cidades ao redor do mundo têm excedido cada vez mais os níveis aceitáveis de ozônio no ar, e o ar quente do ambiente interno pode conter ainda mais ozônio.[54] A inalação de ozônio pode inflamar e danificar as vias aéreas, tornar os pulmões mais suscetíveis a infecções e agravar doenças pulmonares, como asma, enfisema e bronquite crônica.[55]

A exposição a longo prazo está associada ao desenvolvimento de doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC) na idade adulta.[56]

Calor—Embora não seja uma fonte direta de poluição, a temperatura desempenha um papel significativo na formação de como vários poluentes se comportam em um ambiente e afetam a saúde e o desenvolvimento das crianças. Por isso, o calor é um fator importante na qualidade do ar interno. O calor extremo pode fazer com que os ventos enfraqueçam, levando a atmosfera a estagnar, essencialmente "cozinhando" o ar e tudo o que há nele — como partículas finas, produtos químicos e COVs.[57] Quando há ventilação inadequada, o ar interno também "cozinha", fazendo com que o ar produza ozônio mais rapidamente[54] e os COVs sejam liberados de materiais domésticos em maiores quantidades. Uma vez misturado no ar, o ozônio pode interagir com os COVs e aumentar as concentrações de formaldeído, que é conhecido por causar câncer.[12]

A poluição do ar não age sozinha

Os bairros onde as crianças vivem, crescem, brincam e aprendem têm uma influência significativa na qualidade do ar que respiram no ambiente interno e externo. Como resultado de práticas discriminatórias de concessão de crédito e zoneamento — tanto históricas quanto atuais —, uma proporção maior de famílias negras, hispânicas e de baixa renda vive em bairros com edifícios escolares e moradias de qualidade inferior e abaixo do padrão em comparação com famílias brancas e de renda mais alta.[17,58] Esses bairros são desproporcionalmente zoneados para usos comerciais e industriais pesados, o que expõe os moradores à poluição do ar industrial e ao tráfego.[17] Estratégias que abordam as desigualdades no zoneamento, moradia, escolas e edifícios comunitários são extremamente importantes para a saúde pública em geral e podem ter amplos benefícios para as crianças e seus adultos de referência.[59]

Em vez disso, muitas políticas atuais perpetuam desigualdades habitacionais de longa data. Essas práticas incluem políticas discriminatórias contínuas de habitação e zoneamento, empréstimos hipotecários de alto risco e outras barreiras ao acesso a moradias acessíveis e saudáveis.[17] Por exemplo, a prática de zoneamento de bairros ricos, principalmente brancos, como exclusivamente unifamiliares e de baixa densidade impede ainda mais que edifícios de várias unidades com aluguel acessível estejam disponíveis em comunidades com maior oportunidade e ar mais limpo.[58] Esses tipos de políticas representam decisões que determinam quais lugares se beneficiam de investimentos em infraestrutura e manutenção e quais não. Esses investimentos — ou a falta deles — têm efeitos diretos na saúde e no desenvolvimento de nossas crianças.

A histórica falta de investimento em infraestrutura para o bem comum e a incapacidade de garantir que a moradia esteja disponível a preços acessíveis não afetam apenas a moradia pública e as escolas urbanas — elas podem ter outras consequências igualmente perigosas para a saúde e o desenvolvimento das crianças pequenas.

Partículas suspensas no ar, poeira, produtos químicos, vírus/bactérias, vermes e estresse são todos reconhecidos como fatores que contribuem para diversas condições respiratórias e alérgicas, incluindo asma. O fato de uma criança desenvolver asma ou ter seus sintomas agravados depende de quantas vezes e o quanto ela é exposta a esses gatilhos e

de como as exposições interagem com as predisposições genéticas de cada pessoa.[60] Em indivíduos suscetíveis, esses gatilhos podem iniciar uma resposta inflamatória mais excessiva no corpo, danificando as células dos pulmões. As partículas finas também podem bloquear as vias aéreas dos pulmões, contribuindo para a redução da função pulmonar.[26] O mofo doméstico e a má ventilação por si só contribuem para 21% de todos os casos de asma nos EUA[61], e a asma afeta desproporcionalmente crianças negras e porto-riquenhas de baixa renda.[17,62] Estima-se que a eliminação de fatores de risco residenciais como esses resultaria em um declínio de 44% na asma diagnosticada por médicos entre crianças dos EUA menores de 6 anos.[63]

Além das desigualdades de habitação descritas acima, muitas crianças e adultos de referência nos EUA não têm moradia permanente. Essa é uma questão crítica para a saúde e o desenvolvimento infantil, com grandes implicações para a exposição ao ar interno. Em 2023 estimou-se que no mínimo 100 mil crianças estavam sem moradia permanente nos EUA; quase 60% delas viviam em abrigos.[64] Embora mais pesquisas sejam necessárias para entender as exposições de crianças que vivem nesses ambientes, estudos iniciais demonstraram que há duas ou seis vezes mais casos de asma entre crianças pequenas neles do que a média nacional,[65-67] e que crianças e jovens sem moradia são hospitalizados por asma 31 vezes mais do que crianças com moradia.[68] Talvez porque os abrigos tendem a ser mal ventilados e superlotados, e muitos abrigos estão disponíveis apenas durante a noite,[17] aqueles que os utilizam estão expostos a quantidades semelhantes de poluição do ar que as pessoas sem moradia. Em um estudo, 90% das pessoas sem moradia relataram procurar atendimento médico para condições associadas à má qualidade do ar, sem diferenças significativas entre indivíduos abrigados e desabrigados.[69]

> **Estratégias que abordam desigualdades no zoneamento, habitação, escolas e edifícios comunitários são extremamente importantes para a saúde pública em geral e podem ter amplos benefícios para as crianças e seus adultos de referência.**

As soluções existem, mas podem ser difíceis de implementar, apontando para a necessidade crítica de aumentar o acesso a habitações seguras e saudáveis para todas as pessoas durante a gravidez e a primeira infância. Por exemplo, durante a pandemia de Covid-19, o Departamento de Saúde Pública de Seattle e do Condado de King, em Washington, distribuíram para os abrigos mais de 4.000 purificadores de ar portáteis com filtros de Detenção Altamente Eficaz de Partículas (HEPA, na sigla em inglês). Um estudo de acompanhamento mostrou que esses filtros poderiam ser uma estratégia eficaz de curto prazo para reduzir os níveis de partículas internas, mas também descobriu que muitas vezes os abrigos não tinham os recursos para manter os limpadores portáteis ligados e funcionando.[70]

Estratégias eficazes para promover a equidade na qualidade do ar podem criar um efeito multiplicador

O ar interno mais limpo e a melhoria da saúde ao longo da vida de nossos filhos estão ao alcance, começando com uma melhor ventilação e filtragem, particularmente nos ambientes onde passamos a maior parte do tempo durante

a gravidez e a primeira infância. Com isso em mente, para maior efeito, a melhoria deve começar priorizando creches, escolas, cozinhas e quartos.[7,71] Outros ambientes internos importantes incluem centros comunitários, escritórios, instalações médicas, residências unifamiliares e multifamiliares, prédios de apartamentos, casas móveis e pré-fabricadas, abrigos e locais de entretenimento, como cinemas, bem como microambientes, como carros, ônibus e trens.[72,73]

Uma abordagem equilibrada para um ar interno mais limpo incluiria a tomada de medidas em três níveis distintos de soluções. Primeiro, podemos **proteger** as crianças dos maiores danos por meio de ações imediatas que melhorem a qualidade do ar em ambientes internos específicos e apoiem aquelas que foram expostos à má qualidade do ar interno e estão experimentando efeitos adversos como resultado. Em segundo lugar, podemos **adaptar** nossas práticas de construção, zoneamento e saúde pública para garantir a disponibilidade total e equitativa de ambientes internos com ar limpo. Isso inclui alocar recursos para reformar ou atualizar ambientes para melhorar uma variedade de recursos que contribuem para a boa qualidade do ar. Em terceiro lugar, devemos **evitar** as causas da poluição do ar na fonte — por meio de políticas, pressão do público sobre os formuladores de políticas e líderes com poder de decisão, e com o mesmo tipo de inovação industrial que enfrentou os problemas de poluição do ar externo dos anos 70 e 80. Devemos aplicar estratégias semelhantes aos problemas de qualidade do ar do século XXI, como reduzir a queima de combustíveis fósseis que estão aquecendo nosso planeta e levando a calor e incêndios florestais mais intensos, além de reduzir o uso de produtos químicos tóxicos em produtos de limpeza e fabricação e aplicação dos regulamentos existentes da EPA. É igualmente importante garantir que os bairros desfavorecidos, especialmente aqueles localizados perto de fontes de poluição do ar, recebam monitoramento igual em comparação com bairros com mais recursos econômicos e maiores porcentagens de residentes brancos.[74] Todas essas abordagens são necessárias, todas têm soluções prontas e todas contribuirão para melhorar drasticamente as perspectivas de cada criança de viver uma vida mais longa e saudável.

Proteja: tome medidas imediatas para reduzir os danos

Monitore a qualidade do ar interno em creches e escolas. Para ajustar os sistemas para melhorar a qualidade do ar, os responsáveis por edifícios públicos, como escolas, precisam saber quais substâncias estão contaminando seu ar, de onde vêm esses poluentes e qual é o tamanho do problema. Isso pode ser feito por meio de sensores de qualidade do ar interno, de baixo custo, em creches e salas de aula.

Opte por produtos mais seguros para construção, limpeza e outros usos domésticos. Os materiais de limpeza comerciais, tintas e colas são uma fonte significativa de COVs no ar interno.[14] Exigir o uso de materiais com baixo teor de COV em creches, escolas, acampamentos e escritórios reduziria a exposição a esses produtos químicos tóxicos[12] durante a gravidez e a primeira infância e diminuiria o risco de uma série de condições pulmonares, incluindo asma infantil e infecções respiratórias.[14] Finalmente, exigir materiais que estejam livres para sempre de produtos químicos tóxicos, retardadores de chama e ftalatos nas escolas e creches pode diminuir significativamente a exposição a esses poluentes nocivos. Saiba mais sobre este tópico em "Recursos para entrar em ação" abaixo.

Utilize um exaustor de cozinha com coifa que ventile para o exterior. Em residências e outros edifícios onde esses exaustores já estão instalados, usá-los de forma consistente antes, durante e depois do cozimento pode ajudar porque o uso da cozinha é uma das maiores fontes de poluição interna em residências.[13,19]

A ventilação para o exterior é extremamente importante, pois muitos exaustores simplesmente recirculam o ar para dentro da casa. Os ventiladores de janela também podem ser usados para soprar o ar interno para fora — as unidades de condicionador de ar nas janelas, normalmente apenas reciclam o ar interno. Os edifícios também podem ser adaptados para instalação de exaustores ou modernizar a ventilação para que a captação seja ventilada para o exterior, em vez de voltar para a cozinha.

Utilize purificadores de ar portáteis com filtros HEPA em creches, salas de aula e residências como um complemento para melhorar a qualidade do ar interno. Esses filtros independentes são econômicos e podem ser úteis quando as atualizações do sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) não são possíveis ou como uma maneira adicional de garantir uma boa qualidade do ar. Eles podem remover 99,97% das partículas e bactérias transportadas pelo ar, mas devem ser dimensionados corretamente para o espaço em que estão. Recursos como a Ferramenta Portátil de Dimensionamento do Filtro de Ar (PACS, na sigla em inglês) podem ser usados para selecionar um filtro de ar portátil de tamanho apropriado com base em fatores como o tipo de edifício e os recursos de ventilação. (Os compradores devem evitar purificadores portáteis com ionizadores que também geram ozônio, o que pode reduzir a qualidade do ar.[75]) Ao reduzir a poluição do ar em ambientes internos e os alérgenos no ar, os filtros HEPA também podem reduzir os sintomas de asma e melhorar a função pulmonar.[76] A localização é importante: para prevenir doenças, é recomendável implantar um filtro de ar portátil no centro da sala e ajustá-lo para se localizar na altura da respiração dos ocupantes (por exemplo, 90-120 cm para crianças sentadas em escolas e mais perto do chão para creches) pode aumentar a eficácia em ambientes com má circulação de ar.[77] Permitir que os médicos "prescrevam" filtros HEPA ou Valor Mínimo de Eficiência 13 (MERV 13, na sigla em inglês) para sistemas de ar para creches e residências próximas a ruas poluídas e aquelas em áreas afetadas pela fumaça de incêndios florestais poderia dar às famílias de baixa renda e aos funcionários de creches acesso a subsídios para melhorar a qualidade do ar para crianças.

> Exigir materiais que estejam livres para sempre de produtos químicos tóxicos, retardadores de chama e ftalatos nas escolas e creches pode diminuir significativamente a exposição a esses poluentes nocivos.

Adapte: aloque recursos para melhorar os sistemas, serviços e infraestrutura atuais

Reduzir e absorver emissões com barreiras de vegetação. A adição de barreiras de vegetação natural perto de creches, escolas e outros edifícios em zonas de alto tráfego pode ajudar a reduzir a exposição à poluição do ar tanto em ambiente internos quanto externos.[78] Um estudo mostrou que barreiras de arbustos e árvores suficientemente altas e profundas podem reduzir em até 60% as partículas poluentes que chegam aos habitantes dos edifícios próximos.[79]

Faça a transição para aparelhos menos poluentes. Em residências e creches que usam aquecimento a gás e fogões, as concentrações de poluição atmosférica prejudicial que contém dióxido de nitrogênio e partículas transportadas pelo ar podem ser maiores do que no ambiente externo.[76] Os fogões de indução, que usam uma bobina de cobre para criar energia eletromagnética, são três vezes mais eficientes do que os fogões a gás e produzem 40 vezes menos emissões de partículas ultrafinas.[76] A conversão de gás para fogões de indução é cara, mas os subsídios para essa mudança protegeriam a saúde, economizariam energia e reduziriam as emissões de gases de efeito estufa. A eliminação gradual do gás natural para aquecimento e cozimento não apenas

melhorará a saúde respiratória, reduzindo subprodutos perigosos e poluentes secundários, como o ozônio, mas também mitigará os impactos das mudanças climáticas, reduzindo os vazamentos de gases de efeito estufa, como o metano.[76] Cidades dos EUA, como Cleveland, já estão implementando programas de substituição de utensílios de cozinha para apoiar os esforços de melhoria da qualidade do ar interno e aumento da resiliência climática de suas comunidades.

Torne os edifícios mais saudáveis. De acordo com o Healthy Buildings Program (Programa Edifícios Saudáveis, em tradução livre) da Escola de Saúde Pública T.H. Chan de Harvard, uma abordagem para fornecer qualidade do ar que realmente apoie a boa saúde incluiria a implementação das seguintes medidas pelos responsáveis pela construção, manutenção e supervisão de edifícios:

- usar ventilação que controle as fontes internas de odores, produtos químicos tóxicos e dióxido de carbono e filtre pelo menos 75% das partículas;
- fornecer manutenção e monitoramento regulares dos sistemas de ventilação;
- escolher suprimentos, móveis e materiais de construção com baixas emissões químicas;
- instalar uma barreira de vapor (material que controla a umidade e evita o mofo); e
- implementar um plano integrado de manejo de pragas com foco em medidas preventivas, como a vedação de pontos de entrada, a prevenção do acúmulo de umidade e a remoção de lixo.[80]

Instale e mantenha sistemas adequados de ventilação e filtragem em escolas localizadas em bairros de baixa renda e verifique se seus sistemas prediais estão operando conforme projetado. Os filtros para sistemas HVAC usam um sistema de classificação de eficácia conhecido como MERV.[79] Os sistemas HVAC centralizados são projetados principalmente para aquecimento e resfriamento, mas quando equipados com filtros MERV 13 de alta eficiência, que são viáveis em quase todos os sistemas, eles podem remover até 90% das partículas transportadas pelo ar.[79] A atualização de filtros em sistemas HVAC existentes para aqueles com classificações de MERV 13 ou superiores reduz a exposição das crianças a poluentes do ar gerados em ambientes internos (incluindo aqueles gerados pela limpeza, aspiração, cozimento ou uso frequente de impressoras), bem como aqueles que vêm do ambiente externo e que entram no meio interno (como MP2,5 do tráfego, de incêndios florestais e de poeira externa).

A manutenção e o uso adequados de sistemas de HVAC recentemente adaptados e atualizados nas escolas melhorariam significativamente a saúde e o desempenho escolar das crianças, mas é surpreendentemente raro. Por exemplo, um estudo da Califórnia com escolas com sistemas de climatização recentemente adaptados descobriu que apenas 5% das salas de aula atendiam às taxas mínimas de ventilação devido à escolha inadequada dos equipamentos, configurações incorretas de controle do ventilador e problemas de manutenção, como a não substituição dos filtros.[81,82] A instalação e o uso adequado desses sistemas podem ter um efeito significativo na saúde infantil: um estudo de uma escola localizada perto de uma rua de alto tráfego descobriu que o uso de um sistema de ventilação com filtros de partículas finas (classificado como MERV 14) reduziu a exposição das crianças às emissões do trânsito em cerca de um terço.[83]

Previna: aborde as causas da má qualidade do ar interior, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e investindo em fontes de energia renováveis

Promulgue políticas e regulamentos regionais, estaduais e locais que melhorem a qualidade do ar interno, reduzindo as fontes de poluição em todos os ambientes de desenvolvimento.

A Lei Federal do Ar Limpo de 1970 e muitos exemplos de políticas estaduais e comunitárias demonstraram o poder da regulamentação para melhorar a qualidade do ar e a saúde. Por exemplo, o Programa de Aquecimento Limpo de 2012 da Cidade de Nova York apoiou a transição de fontes de aquecimento de combustíveis fósseis para formas de energia mais limpas. Em apenas quatro anos, alcançou reduções documentadas nos gases de poluição do ar externo, com um impacto positivo demonstrado nos resultados de saúde.[76,84] Em 2023, Nova York se tornou o primeiro estado a aprovar uma lei que elimina gradualmente o gás e outros combustíveis fósseis em novos edifícios residenciais.[85] A expansão dessas e de outras políticas que reduzem a poluição do ar externo também contribuiria para melhorar o ar que respiramos nos ambientes internos, mas elas são insuficientes sem novas regulamentações que abordem especificamente a qualidade do ar interno. Por exemplo, deve ser de bom senso e política sólida exigir que os produtos de limpeza e construção, tapetes, móveis e aparelhos de cozinha que usamos em locais onde passamos a maior parte do tempo durante a gravidez e a infância sejam seguros e livres de toxinas.

Desenvolva e imponha padrões regulatórios baseados em saúde para a qualidade do ar interno, para que isso se torne a norma quando os edifícios forem projetados, construídos e renovados. Os padrões atuais para taxas mínimas de ventilação para a qualidade do ar interno que foram estabelecidos pela Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar-Condicionado (ASHRAE, na sigla em inglês) — uma organização internacional de membros focada em melhorar a sustentabilidade do aquecimento, ventilação e ar condicionado — são baseados no controle de odores, não na saúde, apesar de muitos estudos demonstrarem que atender a esses padrões é insuficiente para nossa saúde.[86] Taxas de ventilação mais altas estão associadas a um melhor desempenho em testes de leitura e matemática, menor risco de infecção respiratória, melhores pontuações de função cognitiva e uma diminuição no absenteísmo.[87] Apesar da pesquisa robusta que demonstra os benefícios econômicos e de saúde provenientes de taxas de ventilação mais altas, os padrões para taxas "aceitáveis" continuam a ser a base para muitos códigos de construção. Organizações profissionais, incluindo um grupo de mais de 40 especialistas internacionais, bem como a Comissão Lancet para Covid-19,[88] propuseram padrões de ventilação para qualidade do ar interno com base na saúde, e esses padrões podem ser implementados em toda a gama de ambientes onde as crianças passam o tempo, incluindo escolas, creches e unidades habitacionais.

Atualmente, não existem padrões nacionais para a qualidade do ar interno nas escolas, e a EPA não exige monitoramento do ar nas escolas (embora no momento da publicação deste artigo, uma proposta de legislação bipartidária capacitaria a EPA a tomar medidas para abordar a qualidade do ar interno nas escolas), impulsionando ainda mais as desigualdades na saúde e no aprendizado, que são exacerbadas pela falta de financiamento consistente para manutenção e reparos das instalações escolares. Embora muitas escolas em todo o país tenham tomado medidas para melhorar a qualidade do ar interno, a responsabilidade atualmente recai sobre os distritos escolares, e não o governo estadual ou federal, levando a uma grande variabilidade e desigualdades nos ambientes internos para as crianças, dependendo da região onde vivem.

Instale novas creches e escolas em áreas com menos poluição do ar. Nos EUA, cerca de 8.000 escolas que atendem a 4,4 milhões de alunos — 1 em 11 escolas — estão localizadas a menos de 150 metros de uma rua com alto fluxo de tráfico (com tráfego diário de pelo menos 30.000 veículos).[89] Viver e ir à escola perto de ruas movimentadas está associado a um

risco maior de asma e bronquite crônica, desenvolvimento pulmonar atrofiado e câncer,[90] bem como menor desempenho acadêmico.[59] Um estudo de 2024 feito em duas creches de lugares diferentes mostrou que a mais próxima de uma rodovia tinha concentrações 68% maiores de partículas grandes nos ambientes internos. A EPA emitiu diretrizes voluntárias de localização de escolas[91] e, em 2003, a Califórnia promulgou uma lei que impede que novas escolas sejam construídas a menos de 150 metros de ruas movimentadas para resolver os problemas de qualidade do ar.

Desenvolva políticas e regulações que limitem a circulação de veículos perto de escolas e bairros residenciais e exijam ônibus elétricos ou que usem combustíveis mais limpos para reduzir a exposição das crianças a partículas transportadas pelas emissões que sopram das ruas para os edifícios.[78] As crianças que andam de ônibus mais limpos também estão expostas a menos poluição do ar e tendem a mostrar menos evidências de inflamação e crescimento pulmonar mais rápido ao longo do tempo, enquanto as escolas observam uma redução no absenteísmo.[79,92] Os pesquisadores estimaram que os benefícios para a saúde da substituição de um ônibus a diesel por um ônibus elétrico chegam a 43.800 dólares (em grande parte devido a reduções nas mortes relacionadas à poluição e novos casos de asma na infância), sendo que os maiores benefícios ocorrem ao substituir os ônibus mais antigos nas áreas mais densamente povoadas.[93] O estabelecimento de zonas de baixa emissão, como foi feito em mais de 200 cidades da Europa, é outra abordagem eficaz — um estudo de 2024 documentou uma redução de 13% nas prescrições de medicamentos para asma até os 5 anos de idade para crianças que estavam em uma zona de baixa emissão no primeiro ano de vida e durante a gravidez, em comparação com crianças fora dessa zona.[94]

A implementação de todos os três níveis de soluções — proteger, adaptar e prevenir — exigirá que indivíduos e organizações dos setores público e privado trabalhem juntos. Embora cada um desses níveis de solução seja eficaz no atendimento de necessidades e oportunidades específicas, nenhum será suficiente isoladamente, particularmente porque a poluição do ar interno não age sozinha. Calor excessivo, água contaminada, variáveis sociodemográficas e muitos outros fatores, como estresse, pobreza, discriminação e falta de oportunidade, também influenciam se crianças e seus adultos de referência têm o que precisam para prosperar.[60] Investir em soluções em todos os níveis é essencial para garantir o desenvolvimento saudável de todas as crianças. A longo prazo, as soluções mais profundas estão nas causas primárias — reduzir as causas da poluição do ar e dos incêndios florestais e eliminar os produtos químicos tóxicos escondidos nos produtos vendidos amplamente ao público. Embora os desafios sejam significativos, existem soluções disponíveis que podemos implementar agora para nos proteger e aos nossos filhos para adaptar os sistemas locais em resposta às nossas necessidades atuais. A saúde e o bem-estar futuros de nossas comunidades — e de nossas crianças — dependem disso.

Recursos para entrar em ação

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (Agência de Substâncias Tóxicas e Registro de Doenças)
Formaldehyde in Your Home
(Formaldeído em sua casa)

American Lung Association (Associação Americana do Pulmão)
Healthy Air Initiatives (Iniciativas de Ar Saudável)

Centers for Disease Control and Prevention (Centro de Controle e Prevenção de Denças)
About Ventilation and Respiratory Viruses
(Sobre ventilação e vírus respiratórios)

Citizen Science (Ciência Cidadã)
Learn how the public can get involved to advance inclusive research
(Saiba como o público pode se envolver para promover a pesquisa inclusiva)

Enterprise
How Affordable Housing Can Address Harm Caused by Air Pollution
(Como a habitação acessível pode resolver os danos causados pela poluição do ar)

Children's Environmental Health Network (Rede de Saúde Ambiental Infantil)
Eco-Healthy Child Care (Cuidados infantis eco-saudáveis)
Fichas Técnicas: Air Quality (Qualidade do Ar)

Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health (Escola Bloomberg de Saúde Pública Johns Hopkins)
How States Can Better Regulate Indoor Air Quality
(Como os Estados podem regulamentar melhor a qualidade do ar interior)

Public Health Insider
How Childcare and Early Learning Programs Are Taking Simple Steps to Improve Indoor Air Quality (Como os programas de creches e aprendizagem na idade certa estão tomando medidas simples para melhorar a qualidade do ar interno)

Respiratory Health Association (Associação de Saúde Respiratória)
Advocacy opportunities
(Oportunidades de defesa)

US Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos)

- Air Sensor Toolbox (Caixa de ferramentas do sensor de ar)
- Clean School Bus Program (Programa ônibus escolar limpo)
- Healthy School Environments (Ambientes escolares saudáveis)
- Identifying Greener Cleaning Products (Como identificar produtos de limpeza mais limpos)
- Indoor Air Quality by Building Type (Qualidade do ar interno por tipo de construção)
- Recommendations for Constructing Roadside Vegetation Barriers to Improve Near-Road Air Quality (Recomendações para a construção de barreiras de vegetação nas ruas para melhorar a qualidade do ar nas proximidades)
- Regional and State Contacts for Indoor Air Quality (Contatos regionais e estaduais para a qualidade do ar interno)

Leitura adicional

Designing vegetation barriers for urban air pollution abatement: a practical review for appropriate plant species selection (Projetando barreiras vegetais para a redução da poluição do ar urbano: uma revisão prática para a seleção adequada de espécies vegetais) (Barwise & Kumar, Nature Partner Journal Climate and Atmospheric Science)

Engaging communities in addressing air quality: a scoping review (Envolver as comunidades na abordagem da qualidade do ar: uma revisão do escopo)
(Ward et al., Environmental Health)

Lancet: COVID Commission Report (Relatório da Comissão de covid) de julho de 2022

The 9 Foundations of a Healthy Building (Os 9 fundamentos para um edifício saudável)

Referências

1. National Scientific Council on the Developing Child. Connecting the Brain to the Rest of the Body: Early Childhood Development and Lifelong Health Are Deeply Intertwined—Working Paper No. 15. 2020. developingchild.harvard.edu
2. Cedeno-Laurent JG, Williams A, MacNaughton P, et al. Building Evidence for Health: Green Buildings, Current Science, and Future Challenges. *Annu Rev Public Health*. Apr 1 2018;39:291-308. doi:10.1146/annurev-publhealth-031816-044420
3. Gardiner B. This landmark law saved millions of lives and trillions of dollars. National Geographic: The National Geographic Society; 2020.
4. US EPA Office of Air and Radiation. The Benefits and Costs of the Clean Air Act from 1990 to 2020. 2011. epa.gov/clean-air-act-overview/benefits-and-costs-clean-air-act-1990-2020-report-documents-and-graphics
5. Burke M, Childs ML, de la Cuesta B, et al. The contribution of wildfire to PM(2.5) trends in the USA. *Nature*. Oct 2023;622(7984):761-766. doi:10.1038/s41586-023-06522-6
6. Klepeis NE, Nelson WC, Ott WR, et al. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *J Expo Anal Environ Epidemiol*. May-Jun 2001;11(3):231-52. doi:10.1038/sj.jea.7500165
7. Nethery E, Brauer M, Janssen P. Time-activity patterns of pregnant women and changes during the course of pregnancy. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. Mar 2009;19(3):317-24. doi:10.1038/jes.2008.24
8. US EPA. How big a problem is poor indoor air quality (IAQ) in schools? US Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/iaq-schools/how-big-problem-poor-indoor-air-quality-iaq-schools
9. US EPA. Volatile Organic Compounds' Impact on Indoor Air Quality. US Environmental Protection Agency. epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality
10. Allen J, Macomber J. Healthy Buildings: *How Indoor Spaces Can Make You Sick—or Keep You Well*. 2022.
11. Weschler CJ. Changes in indoor pollutants since the 1950s. *Atmos Environ*. 2009/01/01/ 2009;43(1):153-169. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.044
12. Vardoulakis S, Giagloglou E, Steinle S, et al. Indoor Exposure to Selected Air Pollutants in the Home Environment: A Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health*. Dec 2 2020;17(23) doi:10.3390/ijerph17238972
13. Royal College of Paediatrics and Child Health. The inside story: Health effects of indoor air quality on children and young peopl. 2020. rcpch.ac.uk/resources/inside-story-health-effects-indoor-air-quality-children-young-people
14. Temkin AM, Geller SL, Swanson SA, Leiba NS, Naidenko OV, Andrews DQ. Volatile organic compounds emitted by conventional and "green" cleaning products in the U.S. market. *Chemosphere*. Nov 2023;341:139570. doi:10.1016/j.chemosphere.2023.139570
15. Tjalvin G, Svanes Ø, Igland J, et al. Maternal preconception occupational exposure to cleaning products and disinfectants and offspring asthma. *J Allergy Clin Immunol*. 2022/01/01/ 2022;149(1):422-431.e5. doi:10.1016/j.jaci.2021.08.025
16. Ferguson L, Taylor J, Davies M, Shrubsole C, Symonds P, Dimitroulopoulou S. Exposure to indoor air pollution across socio-economic groups in high-income countries: A scoping review of the literature and a modelling methodology. *Environ Int*. Oct 2020;143:105748. doi:10.1016/j.envint.2020.105748
17. Swope CB, Hernandez D. Housing as a determinant of health equity: A conceptual model. *Soc Sci Med*. Dec 2019;243:112571. doi:10.1016/j.socscimed.2019.112571
18. Holden KA, Lee AR, Hawcutt DB, Sinha IP. The impact of poor housing and indoor air quality on respiratory health in children. *Breathe (Sheff)*. Jun 2023;19(2):230058. doi:10.1183/20734735.0058-2023
19. Chiarello DI, Ustariz J, Marin R, et al. Cellular mechanisms linking to outdoor and indoor air pollution damage during pregnancy. *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2023;14:1084986. doi:10.3389/fendo.2023.1084986
20. Ghazi T, Naidoo P, Naidoo RN, Chuturgoon AA. Prenatal Air Pollution Exposure and Placental DNA Methylation Changes: Implications on Fetal Development and Future Disease Susceptibility. *Cells*. Nov 5 2021;10(11). doi:10.3390/cells10113025
21. Tuazon JA, Kilburg-Basnyat B, Oldfield LM, et al. Emerging Insights into the Impact of Air Pollution on Immune-Mediated Asthma Pathogenesis. *Curr Allergy Asthma Rep*. Jul 2022;22(7):77-92. doi:10.1007/s11882-022-01034-1
22. National Scientific Council on the Developing Child. A World of Differences: The Science of Human Variation Can Drive Early Childhood Policies and Programs to Bigger Impacts: Working Paper No. 17. 2024. developingchild.harvard.edu
23. Christensen GM, Marcus M, Naude PJW, et al. Joint effects of prenatal exposure to indoor air pollution and psychosocial factors on early life inflammation. *Environ Res*. Jul 1 2024;252(Pt 1):118822. doi:10.1016/j.envres.2024.118822
24. Liu K, Hua S, Song L. PM2.5 Exposure and Asthma Development: The Key Role of Oxidative Stress. *Oxid Med Cell Longev*. 2022;2022:3618806. doi:10.1155/2022/3618806
25. Basilio E, Chen R, Fernandez AC, Padula AM, Robinson JF, Gaw SL. Wildfire Smoke Exposure during Pregnancy: A Review of Potential Mechanisms of Placental Toxicity, Impact on Obstetric Outcomes, and Strategies to Reduce Exposure. *Int J Environ Res Public Health*. Oct 22 2022;19(21). doi:10.3390/ijerph192113727
26. Veras MM, de Oliveira Alves N, Fajersztajn L, Saldiva P. Before the first breath: prenatal exposures to air pollution and lung development. *Cell Tissue Res*. Mar 2017;367(3):445-455. doi:10.1007/s00441-016-2509-4
27. US EPA. Facts About Formaldehyde. US Environmental Protection Agency. Accessed 7/4/2024. epa.gov/formaldehyde/facts-about-formaldehyde
28. Franklin P, Tan M, Hemy N, Hall GL. Maternal Exposure to Indoor Air Pollution and Birth Outcomes. *Int J Environ Res Public Health*. Apr 16 2019;16(8). doi:10.3390/ijerph16081364
29. Costa LG, Cole TB, Dao K, Chang YC,

Coburn J, Garrick JM. Effects of air pollution on the nervous system and its possible role in neurodevelopmental and neurodegenerative disorders. *Pharmacol Ther*. Jun 2020;210:107523. doi:10.1016/j.pharmthera.2020.107523

30. Sen A, Heredia N, Senut MC, et al. Multigenerational epigenetic inheritance in humans: DNA methylation changes associated with maternal exposure to lead can be transmitted to the grandchildren. *Sci Rep*. Sep 29 2015;5:14466. doi:10.1038/srep14466

31. K CA, Basel PL, Singh S. Low birth weight and its associated risk factors: Health facility-based case-control study. *PLoS One*. 2020;15(6):e0234907. doi:10.1371/journal.pone.0234907

32. US CDC. Preterm Birth. US Centers for Disease Control and Prevention. Accessed 7/13/24. cdc.gov/maternal-infant-health/preterm-birth/index.html

33. Cromar K, Gladson L, Gohlke J, Li Y, Tong D, Ewart G. Adverse Health Impacts of Outdoor Air Pollution, Including from Wildland Fires, in the United States: "Health of the Air," 2018-2020. *Ann Am Thorac Soc*. Jan 2024;21(1):76-87. doi:10.1513/AnnalsATS.202305-455OC

34. Goodrich AJ, Kleeman MJ, Tancredi DJ, et al. Pre-pregnancy ozone and ultrafine particulate matter exposure during second year of life associated with decreased cognitive and adaptive functioning at aged 2-5 years. *Environ Res*. Jul 1 2024;252(Pt 1):118854. doi:10.1016/j.envres.2024.118854

35. Vanbrabant K, Van Dam D, Bongaerts E, et al. Accumulation of Ambient Black Carbon Particles Within Key Memory-Related Brain Regions. *JAMA Netw Open*. Apr 1 2024;7(4):e245678. doi:10.1001/jamanetworkopen.2024.5678

36. Zundel CG, Ryan P, Brokamp C, et al. Air pollution, depressive and anxiety disorders, and brain effects: A systematic review. *Neurotoxicology*. Dec 2022;93:272-300. doi:10.1016/j.neuro.2022.10.011

37. Ruis M, Hoffman K, Stapleton HM. Brominated flame retardants and legacy organochlorines in archived human placenta samples: Sex differences, temporal analysis and associations with infant birth weight. *Chemosphere*. May 2023;322:138170. doi:10.1016/j.chemosphere.2023.138170

38. Leonetti C, Butt CM, Hoffman K, Hammel SC, Miranda ML, Stapleton HM. Brominated flame retardants in placental tissues: associations with infant sex and thyroid hormone endpoints. *Environ Health*. Nov 25 2016;15(1):113. doi:10.1186/s12940-016-0199-8

39. Rahman MM, Shu YH, Chow T, et al. Prenatal Exposure to Air Pollution and Autism Spectrum Disorder: Sensitive Windows of Exposure and Sex Differences. *Environ Health Perspect*. Jan 2022;130(1):17008. doi:10.1289/EHP9509

40. Dickerson AS, Rotem RS, Christian MA, Nguyen VT, Specht AJ. Potential Sex Differences Relative to Autism Spectrum Disorder and Metals. *Curr Environ Health Rep*. Dec 2017;4(4):405-414. doi:10.1007/s40572-017-0164-x

41. Yu X, Rahman MM, Wang Z, et al. Evidence of susceptibility to autism risks associated with early life ambient air pollution: A systematic review. *Environ Res*. 2022/05/15/ 2022;208:112590. doi:10.1016/j.envres.2021.112590

42. Lin C-K, Chang Y-T, Lee F-S, Chen S-T, Christiani D. Association between exposure to ambient particulate matters and risks of autism spectrum disorder in children: a systematic review and exposure-response meta-analysis. *Environ Res Lett*. 2021/05/28 2021;16(6):063003. doi:10.1088/1748-9326/abfcf7

43. US CDC. Facts About Benzene. US Centers for Disease Control and Prevention. emergency.cdc.gov/agent/benzene/basics/facts.asp

44. D'Andrea MA, Reddy GK. Health Risks Associated With Benzene Exposure in Children: A Systematic Review. *Glob Pediatr Health*. 2018;5:2333794X18789275. doi:10.1177/2333794X18789275

45. National Scientific Council on the Developing Child. Connecting the Brain to the Rest of the Body: Early Childhood Development and Lifelong Health Are Deeply Intertwined: Working Paper No. 15. 2020. developingchild.harvard.edu

46. Volk HE, Perera F, Braun JM, et al. Prenatal air pollution exposure and neurodevelopment: A review and blueprint for a harmonized approach within ECHO. *Environ Res*. May 2021;196:110320. doi:10.1016/j.envres.2020.110320

47. McGuinn LA, Windham GC, Messer LC, et al. Air pollution, neighborhood deprivation, and autism spectrum disorder in the Study to Explore Early Development. *Environ Epidemiol*. Oct 2019;3(5). doi:10.1097/ee9.0000000000000067

48. Evans J, Bansal A, Schoenaker D, Cherbuin N, Peek MJ, Davis DL. Birth Outcomes, Health, and Health Care Needs of Childbearing Women following Wildfire Disasters: An Integrative, State-of-the-Science Review. *Environ Health Perspect*. Aug 2022;130(8):86001. doi: 10.1289/EHP10544

49. US EPA. Safer Choice. US Environmental Protection Agency. Accessed 7/15/24. epa.gov/saferchoice

50. Steinemann A. Fragranced consumer products: exposures and effects from emissions. *Air Qual Atmos Health*. 2016/12/01 2016;9(8):861-866. doi:10.1007/s11869-016-0442-z

51. Wang X, Li C, Zhou L, et al. Associations of prenatal exposure to PM2.5 and its components with offsprings' neurodevelopmental and behavioral problems: A prospective cohort study from China. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2024/09/01/ 2024;282:116739. doi:10.1016/j.ecoenv.2024.116739

52. Health Impacts of PM2.5. State of Global Air. Accessed Apr 2 2025. stateofglobalair.org/health/pm

53. Ghetu CC, Rohlman D, Smith BW, et al. Wildfire Impact on Indoor and Outdoor PAH Air Quality. *Environ Sci Technol*. Jul 19 2022;56(14):10042-10052. doi:10.1021/acs.est.2c00619

54. Jacob DJ, Winner DA. Effect of climate change on air quality. *Atmos Environ*. 2009/01/01/ 2009;43(1):51-63. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.051

55. US EPA. Health Effects of Ozone Pollution. U.S. Environmental Protection Agency. Accessed 7/17/24. epa.gov/ground-level-ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution

56. State of Global Air 2024. Special Report. 2024. stateofglobalair.org/resources/report/state-global-air-report-2024

57. Burrows L. The complex relationship between heat and ozone. The Harvard Gazette: Harvard University; 2016.

58. Bryant-Stephens TC, Strane D, Robinson EK, Bhambhani S, Kenyon CC. Housing and asthma disparities. *J Allergy Clin Immunol*. Nov 2021;148(5):1121-1129. doi:10.1016/j.jaci.2021.09.023

59. Pastor Jr. M, Morello-Frosch R, Sadd JL. Breathless: Schools, Air Toxics, and Environmental Justice in California. *Policy Studies Journal*. 2006;34(3):337-

362. doi:10.1111/j.1541-0072.2006.00176.x

60. National Scientific Council on the Developing Child. Place Matters: The Environment We Create Shapes the Foundations of Healthy Development. 2023. developingchild.harvard.edu

61. Lemire E, Samuels EA, Wang W, Haber A. Unequal Housing Conditions And Code Enforcement Contribute To Asthma Disparities In Boston, Massachusetts. *Health Aff (Millwood)*. Apr 2022;41(4):563-572. doi:10.1377/hlthaff.2021.01403

62. Perez MF, Coutinho MT. An Overview of Health Disparities in Asthma. *Yale J Biol Med*. Sep 2021;94(3):497-507.

63. Lanphear BP, Kahn RS, Berger O, Auinger P, Bortnick SM, Nahhas RW. Contribution of residential exposures to asthma in us children and adolescents. *Pediatrics*. Jun 2001;107(6):E98. doi:10.1542/peds.107.6.e98

64. US HUD. The 2023 Annual Homelessness Assessment Report (AHAR) to Congress: PART 1: Point-In-Time Estimates of Homelessness. 2023. huduser.gov/portal/datasets/ahar/2023-ahar-part-1-pit-estimates-of-homelessness-in-the-us.html

65. Cutuli JJ, Herbers JE, Rinaldi M, Masten AS, Oberg CN. Asthma and behavior in homeless 4- to 7-year-olds. *Pediatrics*. Jan 2010;125(1):145-51. doi:10.1542/peds.2009-0103

66. McLean DE, Bowen S, Drezner K, et al. Asthma among homeless children: undercounting and undertreating the underserved. *Arch Pediatr Adolesc Med*. Mar 2004;158(3):244-9. doi:10.1001/archpedi.158.3.244

67. Cutuli JJ, Herbers JE, Lafavor TL, Ahumada SM, Masten AS, Oberg CN. Asthma and adaptive functioning among homeless kindergarten-aged children in emergency housing. *J Health Care Poor Underserved*. May 2014;25(2):717-30. doi:10.1353/hpu.2014.0099

68. Sakai-Bizmark R, Chang RR, Mena LA, Webber EJ, Marr EH, Kwong KY. Asthma Hospitalizations Among Homeless Children in New York State. *Pediatrics*. Aug 2019;144(2) doi:10.1542/peds.2018-2769

69. DeMarco AL, Hardenbrook R, Rose J, Mendoza DL. Air Pollution-Related Health Impacts on Individuals Experiencing Homelessness: Environmental Justice and Health Vulnerability in Salt Lake County, Utah. *Int J Environ Res Public Health*. Nov 13 2020;17(22)doi:10.3390/ijerph17228413

70. Huang C-H, Bui T, Hwang D, et al. Assessing the effectiveness of portable HEPA air cleaners for reducing particulate matter exposure in King County, Washington homeless shelters: Implications for community congregate settings. *Sci Total Environ*. 2023/09/15/ 2023;891:164402. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.164402

71. Lizana J, Almeida SM, Serrano-Jiménez A, et al. Contribution of indoor microenvironments to the daily inhaled dose of air pollutants in children. The importance of bedrooms. *Build Environ*. 2020;183:107188.

72. Diapouli E, Chaloulakou A, Spyrellis N. Levels of ultrafine particles in different microenvironments--implications to children exposure. *Sci Total Environ*. Dec 15 2007;388(1-3):128-36. doi:10.1016/j.scitotenv.2007.07.063

73. Marinello S, Lolli F, Coruzzolo AM, Gamberini R. Exposure to Air Pollution in Transport Microenvironments. *Sustainability*. 2023;15(15):11958.

74. Su JG, Aslebagh S, Vuong V, et al. Examining air pollution exposure dynamics in disadvantaged communities through high-resolution mapping. *Sci Adv*. 2024;10(32):eadm9986. doi:10.1126/sciadv.adm9986

75. Holm SM, Miller MD, Balmes JR. Health effects of wildfire smoke in children and public health tools: a narrative review. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. Feb 2021;31(1):1-20. doi:10.1038/s41370-020-00267-4

76. Nassikas NJ, McCormack MC, Ewart G, et al. Indoor Air Sources of Outdoor Air Pollution: Health Consequences, Policy, and Recommendations: An Official American Thoracic Society Workshop Report. *Ann Am Thorac Soc*. Mar 2024;21(3):365-376. doi:10.1513/AnnalsATS.202312-1067ST

77. Pei G, Azimi P, Rim D, Allen JG. A CFD study on the effect of portable air cleaner placement on airborne infection control in a classroom. *Environ Sci Process Impacts*. Jul 8 2024;doi:10.1039/d4em00114a

78. Mullen C, Grineski SE, Collins TW, Mendoza DL. Effects of PM(2.5) on Third Grade Students' Proficiency in Math and English Language Arts. *Int J Environ Res Public Health*. Sep 22 2020;17(18)doi:10.3390/ijerph17186931

79. Rawat N, Kumar P. Interventions for improving indoor and outdoor air quality in and around schools. *Sci Total Environ*. Feb 1 2023;858(Pt 2):159813. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.159813

80. Allen JG. The 9 Foundations of a Healthy Building. Harvard T.H. Chan School of Public Health; 2017. 9foundations.forhealth.org/

81. Chan WR, Li X, Singer BC, et al. Ventilation rates in California classrooms: Why many recent HVAC retrofits are not delivering sufficient ventilation. *Build Environ*. 2020;

82. Mark-Carew M KG, Pampati S, Mead KR, Martin SB Jr., Barrios LC. Ventilation Improvements Among K–12 Public School Districts — United States, August–December 2022. MMWR *Morb Mortal Wkly Rep*. 2022;72:372–376. doi:10.15585/mmwr.mm7214a4

83. van der Zee SC, Strak M, Dijkema MBA, Brunekreef B, Janssen NAH. The impact of particle filtration on indoor air quality in a classroom near a highway. *Indoor Air*. 2017;27(2):291-302. doi:10.1111/ina.12308

84. Zhang L, He MZ, Gibson EA, et al. Evaluating the Impact of the Clean Heat Program on Air Pollution Levels in New York City. *Environ Health Perspect*. 2021;129(12):127701. doi:10.1289/EHP9976

85. Ramirez R, Nilsen E. New York becomes the first state to ban natural gas stoves and furnaces in most new buildings. CNN. cnn.com/2023/05/03/us/new-york-natural-gas-ban-climate/index.html

86. Allen JG. Recommitting to Ventilation Standards for Healthy Indoor Air Quality. *Am J Public Health*. 2024;114(10):991-993. doi:10.2105/ajph.2024.307809

87. US EPA. Evidence from Scientific Literature about Improved Academic Performance. US Environmental Protection Agency. Accessed Apr 2 2025. epa.gov/iaq-schools/evidence-scientific-literature-about-improved-academic-performance

88. Morawska L, Allen J, Bahnfleth W, et al. Mandating indoor air quality for public buildings. *Science*. 2024;383(6690):1418-1420. doi:10.1126/science.adl0677

89. Grineski SE, Collins TW. Geographic and social disparities in exposure to air neurotoxicants at U.S. public schools. *Environ Res*. Feb 2018;161:580-587. doi:10.1016/j.envres.2017.11.047

90. Wolfe MK, McDonald NC, Arunachalam S, Baldauf R, Valencia A. Impact of School Location on Children's Air Pollution Exposure. *J Urban Aff*. Jul 7 2020;43(8).

doi:10.1080/07352166.2020.1734013

91. US EPA. Healthy School Environments: View, Download, or Print the School Siting Guidelines. US Environmental Protection Agency. Accessed 7/31/24. epa.gov/schools/view-download-or-print-school-siting-guidelines

92. Adar SD, D'Souza J, Sheppard L, et al. Adopting Clean Fuels and Technologies on School Buses. Pollution and Health Impacts in Children. *Am J Respir Crit Care Med*. Jun 15 2015;191(12):1413-21. doi:10.1164/rccm.201410-1924OC

93. Choma EF, Robinson LA, Nadeau KC. Adopting electric school buses in the United States: Health and climate benefits. *Proc Natl Acad Sci U S A*. May 28 2024;121(22):e2320338121. doi:10.1073/pnas.2320338121

94. Klauber H, Holub F, Koch N, Pestel N, Ritter N, Rohlf A. Killing Prescriptions Softly: Low Emission Zones and Child Health from Birth to School. *Am Econ J Econ Policy*. 2024;16(2):220–48. doi:10.1257/pol.20210729

95. Young AS, Zoeller T, Hauser R, et al. Assessing Indoor Dust Interference with Human Nuclear Hormone Receptors in Cell-Based Luciferase Reporter Assays. *Environ Health Perspect*. Apr 2021;129(4):47010. doi:10.1289/ehp8054

Center on the Developing Child HARVARD UNIVERSITY

EARLY CHILDHOOD SCIENTIFIC COUNCIL ON EQUITY AND THE ENVIRONMENT

50 Church Street, 4th Floor, Cambridge, MA 02138
617.496.0578
www.developingchild.harvard.edu