

**FORMAÇÃO, CONCENTRAÇÃO E IMPACTO DO OZÔNIO (O₃) EM ÁREAS URBANAS
BRASILEIRAS: UMA ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA SOBRE AS REAÇÕES DE PRECURSORES
GASOSOS.**

Lincoln Lucilio Romualdo*

Izabel Beatriz Rodrigues de Moura

Larissa Martins Pires

Resumo: Este trabalho, sob orientação do Prof. Lincoln Lucilio Romualdo, tem como tema “Formação, concentração e impacto do ozônio (O₃) em áreas urbanas brasileiras: uma análise bibliográfica sobre as reações de precursores gasosos”. A pesquisa foi conduzida por meio de levantamento bibliográfico sistemático, com o objetivo de reunir dados e interpretações científicas sobre os processos químicos que levam à formação do ozônio troposférico (O₃), um dos principais poluentes atmosféricos em ambientes urbanos. A partir da análise de estudos realizados em diferentes cidades brasileiras, buscou-se identificar padrões de concentração do ozônio e os fatores que influenciam sua presença, como os precursores gasosos (hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio - NO_x) em interação com a radiação solar. A escolha por uma abordagem bibliográfica se justifica pela ampla disponibilidade de dados consolidados em pesquisas anteriores, permitindo uma avaliação crítica e comparativa entre diferentes contextos urbanos. O foco central é compreender como a presença do ozônio, em determinadas concentrações e condições ambientais, pode comprometer a qualidade do ar e gerar riscos à saúde humana, ao bem-estar social, aos materiais, à fauna, à flora e à segurança do uso da propriedade, conforme estabelecido pela Resolução do CONAMA (2025). A relevância deste estudo reside na necessidade urgente de mitigar os impactos negativos do ozônio em centros urbanos, contribuindo com subsídios teóricos para ações de controle ambiental e políticas públicas voltadas à melhoria da qualidade do ar no Brasil.

Palavras-chave: Ozônio troposférico; Precursores gasosos; Fotoquímica atmosférica; Qualidade do ar; Poluição urbana.

INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica em áreas **urbanas** brasileiras constitui um dos maiores desafios ambientais e de saúde pública da atualidade. Entre os poluentes de maior relevância, destaca-se o ozônio troposférico (O₃), cuja presença na baixa atmosfera

* Instituto de Química da UFCAT: lincolnromualdo@ufcat.edu.br, izabelbeatrizmoura@gmail.com, martins.larissa2015@gmail.com

está associada a processos fotoquímicos complexos e a impactos diretos sobre a qualidade do ar e a saúde humana.

Para realizarmos este estudo, foi preciso considerar centros urbanos brasileiros em diversas características, como clima, crescimento e estrutura urbana. Também foram analisadas as regiões onde os estudos realizaram medições da emissão de gases poluentes e as localidades mais afetadas pelo poluente em foco neste artigo, o ozônio (O_3). Além disso, outros fatores precisaram ser levados em consideração, dada a complexidade de compreender a formação deste poluente secundário, que impacta os grandes centros de maneira significativa. Outros fatores que podem justificar elevados níveis de ozônio (O_3), conforme Silva e Corrêa (2025), incluem as características topográficas do local, a meteorologia e as condições de vento.

Os materiais consultados para a elaboração deste documento também retratam um panorama histórico a ser considerado, como apresentado em Chiquetto (2016), que mostra sua análise da estrutura urbana de São Paulo desde o século XX. Essa análise vem sendo atualizada ao longo da história da cidade, com fatos relevantes ao estudo do impacto ambiental referente aos poluentes atmosféricos.

No estudo realizado por Alves e Alves (2019), observa-se que a preocupação com o ozônio troposférico ganhou destaque a partir da década de 1940, quando a poluição fotoquímica passou a ser reconhecida como problema ambiental. Os autores ressaltam que, embora o ozônio (O_3) desempenhe papel essencial na estratosfera ao proteger contra a radiação ultravioleta, sua presença na troposfera representa risco significativo: “quando suas concentrações se encontram na troposfera (camada mais baixa), pode causar prejuízos à saúde humana” (Alves e Alves, 2019, p. 30).

Chiquetto (2016) evidencia que o ozônio troposférico (O_3) deve ser compreendido como um poluente secundário, cuja formação resulta de processos fotoquímicos complexos envolvendo óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos orgânicos voláteis (COVs) e a ação da radiação solar. O autor resalta que, em ambientes urbanos, a presença do ozônio (O_3) está fortemente condicionada às emissões provenientes do tráfego veicular e das atividades industriais, configurando-se como um marcador relevante da degradação da qualidade do ar e dos riscos associados à exposição populacional.

Meller (2021) contribui para a compreensão das interações químicas que ocorrem na atmosfera urbana ao analisar a formação de aerossóis orgânicos

secundários. O autor demonstra que os processos oxidativos responsáveis pela geração do ozônio troposférico (O_3) também estão associados à produção de partículas secundárias, resultado da interação entre emissões urbanas de Manaus e compostos biogênicos oriundos da Floresta Amazônica.

“A interação entre as emissões urbanas de Manaus e os compostos biogênicos da floresta resulta em processos oxidativos que favorecem a formação de aerossóis orgânicos secundários e de ozônio troposférico” (Meller, 2021, p. 45). “O ozônio (O_3) constitui uma espécie química que, quando encontrado na estratosfera [...], é responsável por controlar a incidência de radiação ultravioleta na Terra. No entanto, quando suas concentrações se encontram na troposfera [...], pode causar prejuízos à saúde humana” (Alves e Alves, 2019, p. 30).

Estudos recentes reforçam que a formação do ozônio troposférico está diretamente associada às emissões veiculares e industriais, mas também às condições climáticas locais. Silva e Corrêa (2025) destacam que “além dos poluentes primários, emitidos diretamente pelos veículos, formam-se também os poluentes secundários, sendo o principal deles o ozônio (O_3), oriundo das reações entre os óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COV)” (p. 2). Castelhana (2018), por sua vez, observa que “o crescimento do ozônio (O_3) observado em Curitiba [...] seria uma repercussão de alterações na dinâmica climática da região” (p. 36), evidenciando que as mudanças climáticas intensificam os processos fotoquímicos de formação do poluente.

Essa relação evidencia que o ozônio (O_3) não apenas compromete a saúde humana, mas também exerce influência significativa sobre a composição química da atmosfera e sobre os ecossistemas urbanos. Isso reforça a necessidade de monitoramento contínuo e de políticas de controle ambiental voltadas à redução dos impactos da poluição fotoquímica. Este trabalho, orientado pelo Prof. Lincoln Lucílio Romualdo, busca apresentar dados bibliográficos sobre a formação e concentração do ozônio (O_3) em áreas urbanas brasileiras, destacando seus impactos na saúde humana e nos ecossistemas, além de discutir os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 506/2024 (Padrão P-II) e pela Organização Mundial da Saúde (OMS).

Destrinchando um conjunto de informações referentes às reações químicas que dão origem ao ozônio (O_3) e compreendendo procedimentos capazes de avaliar os níveis de emissão do poluente, entendemos que é possível realizar este estudo em

prol do desenvolvimento de ações voltadas à melhoria da qualidade do ar no contexto brasileiro.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo do ozônio troposférico (O_3) em áreas urbanas brasileiras tem sido abordado por diferentes autores, que destacam sua formação, concentração e impactos sobre a saúde humana e o meio ambiente. A literatura evidencia que o ozônio (O_3) é um poluente secundário, resultante de reações fotoquímicas complexas envolvendo óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos orgânicos voláteis (COVs) e radiação solar.

O ozônio (O_3) está contemplado no Índice de Qualidade do Ar (IQA), o qual apresenta valores de concentração dos poluentes considerando a qualidade do ar como boa, com base em recomendações da Organização Mundial da Saúde. Esse fato reforça a necessidade de monitoramento do poluente em questão (MMA, 2019). Alves e Alves (2019) ressaltam que “o ozônio (O_3) troposférico é classificado como um poluente secundário, cuja formação ocorre por meio de reações fotoquímicas na atmosfera, principalmente a partir de óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COVs)” (p. 31).

Os autores destacam ainda que, embora o ozônio (O_3) desempenhe papel fundamental na estratosfera, sua presença na troposfera representa risco significativo: “quando suas concentrações se encontram na troposfera (camada mais baixa), pode causar prejuízos à saúde humana” (ALVES e ALVES, 2019, p. 30).

A pesquisa conduzida por Chiquetto (2016) amplia essa discussão ao relacionar a concentração de ozônio (O_3) com a configuração urbana e o uso do solo. O autor afirma que “a concentração de ozônio troposférico está diretamente associada à configuração do uso do solo urbano, à intensidade das fontes emissoras e às condições meteorológicas locais” (Chiquetto, 2016, p. 22). Esse enfoque evidencia que o ozônio (O_3) não é apenas resultado de processos químicos isolados, mas também reflete a dinâmica urbana, especialmente em regiões de elevada densidade populacional e intensa atividade industrial.

Pode-se afirmar que uma das principais fontes de produção de óxidos de nitrogênio (NO_x) são os veículos automotores. Isso conduz nossa pesquisa a dialogar

com diversas referências que, em diferentes localidades, apontam problemas semelhantes relacionados à emissão veicular (CHIQUELTO, 2016).

De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2019) as fontes de emissão de poluentes atmosféricos são classificadas em estacionárias, de combustão de combustível, processos industriais e outros, veículos rodoviários e fontes móveis não rodoviárias. Essas classificações são importantes para oferecer um entendimento prático de como os poluentes podem afetar as zonas urbanas.

O ozônio (O_3) é relatado como um dos dois poluentes que atraem maior atenção em estudos ao redor do mundo, junto ao material particulado fino ($MP_{2,5}$), devido à grande complexidade em seu processo de formação (Pacheco Júnior, 2018). Outro fator que complexifica o estudo do ozônio (O_3) é o fato de ele não se formar nos locais onde são liberados os poluentes atmosféricos. Alguns estudos mostram que as maiores concentrações ocorrem em zonas rurais e remotas, assim como em parques urbanos, áreas residenciais e regiões de *background* (fundo), que muitas vezes apresentam índices superiores aos dos centros densamente urbanizados (PACHECO JÚNIOR, 2018; CHIQUELTO, 2016).

O argumento acima justifica-se porque o ozônio (O_3) é um poluente secundário, ou seja, não é emitido diretamente, mas formado por meio de reações químicas entre precursores (NO_x e $COVs$) sob a ação da radiação solar. Em áreas de grande tráfego, a elevada emissão de monóxido de nitrogênio proveniente dos veículos consome o ozônio local para formar NO_2 . Esse processo, conhecido como titulação, reduz as concentrações do poluente nas proximidades das vias.

Como consequência, o ozônio (O_3) tende a se acumular em locais mais distantes das fontes de emissão devido ao transporte e ao tempo de reação, já que há uma pluma de precursores deslocada horizontalmente pelo vento para áreas periféricas ou rurais enquanto as reações fotoquímicas ocorrem, podendo levar de dezenas de minutos a algumas horas para atingir o pico de formação. Além disso, o menor consumo local contribui para que o ozônio permaneça na atmosfera por mais tempo em zonas rurais, áreas de preservação ou parques, pela menor densidade de emissões de NO , o que reduz o consumo imediato do poluente. Outro fator relevante são as emissões biogênicas, pois áreas remotas ou parques possuem vegetação que libera compostos orgânicos voláteis biogênicos ($COVBs$), como o isopreno, que

reagem com os NO_x transportados da cidade, intensificando a produção de ozônio nessas regiões.

Conforme Meller (2021) demonstra em pesquisas realizadas no experimento denominado GoAmazon, foi possível identificar que a concentração de ozônio (O_3) quase dobrou em um sítio localizado a apenas 14 km a jusante do centro de Manaus. Foi identificado em pesquisa que, em São Paulo, as estações de monitoramento localizadas no Parque do Ibirapuera e no Pico do Jaraguá (área de preservação) registram historicamente concentrações anuais e máximas muito superiores às das estações veiculares, como a da Marginal Pinheiros ou a do Parque D. Pedro II (CHIQUELLO, 2016).

Pacheco Júnior (2018) demonstra, em pesquisas realizadas no município de Jundiaí, medições na Serra do Japi que revelam que, apesar da distância das fontes industriais, as concentrações podem ser mais elevadas do que na zona urbana em determinados períodos, devido ao transporte e à reatividade biogênica. O estudo voltado para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro também apresenta dados pertinentes: os bairros de Bangu, Irajá e Campo Grande registram maior número de ultrapassagens dos padrões de qualidade do ar para o ozônio (O_3), em contraste com o Centro e Copacabana, que apresentam violações mínimas (OLIVEIRA, 2022).

Isso ocorre porque a região Centro-Sul do Rio de Janeiro atua como um sumidouro de ozônio (O_3), onde as altas emissões de NO provenientes de veículos leves consomem o poluente localmente (SILVA, 2025). Em Bangu, as concentrações elevadas são frequentemente associadas ao transporte de precursores oriundos do tráfego intenso da Avenida Brasil e da Via Dutra. No município de Duque de Caxias, as estações próximas ao Polo Petroquímico e às rodovias, como a Washington Luís (BR-040), registram as maiores concentrações horárias da região, pois recebem a pluma de poluição advectada pelos ventos. Além disso, a Ilha de Paquetá, apesar de não possuir emissões antropogênicas locais, sofre com o ozônio transportado de outras microrregiões da bacia aérea (SILVA, 2016).

Conforme analisado por Bezerra (2023), no município de Rondonópolis-MT foram realizadas amostragens na UFR (Universidade Federal de Rondonópolis), onde um local arborizado apresentou concentrações de ozônio (O_3) superiores às do centro comercial e do terminal rodoviário, sugerindo que precursores gerados em outros

locais são transportados pelo vento até a universidade. Na cidade de Uberlândia-MG, em sua região central, a formação de canyons urbanos e a intensa movimentação de veículos no terminal de ônibus podem favorecer o escoamento de precursores para outras áreas, deslocando o pico de formação do ozônio (O_3) para fora do núcleo urbano (RODRIGUES, 2019).

Ao analisar a formação de aerossóis orgânicos secundários em Manaus, Meller (2021) destaca a interação entre emissões urbanas e biogênicas da Floresta Amazônica. O autor observa que “a interação entre as emissões urbanas de Manaus e os compostos biogênicos da floresta resulta em processos oxidativos que favorecem a formação de aerossóis orgânicos secundários e de ozônio troposférico” (Meller, 2021, p. 45). Essa perspectiva demonstra que o ozônio (O_3) não apenas compromete a saúde humana, mas também influencia a composição química da atmosfera e os ecossistemas, ampliando os impactos da poluição fotoquímica em contextos urbanos e de transição com áreas naturais.

Silva e Corrêa (2025) reforçam esse entendimento ao destacar que “além dos poluentes primários, emitidos diretamente pelos veículos, formam-se também os poluentes secundários, sendo o principal deles o ozônio (O_3), oriundo das reações entre os NO_x e os compostos orgânicos voláteis (COV)” (p. 2). O estudo ainda evidencia que o ozônio (O_3) passou a ser utilizado como parâmetro regulatório para homologação de emissões veiculares, demonstrando sua relevância como indicador da qualidade do ar.

Castelhana (2018) acrescenta uma dimensão climática ao debate ao observar que “altos níveis de ozônio (O_3) apresentam íntima relação com valores de temperatura em ambientes urbanos. O calor age como acelerador do processo, desencadeando um aumento nos níveis do poluente” (p. 38). O autor defende que o crescimento do ozônio (O_3) em Curitiba, mesmo diante da redução de NO_2 , pode ser explicado pelas alterações na dinâmica climática regional, evidenciando que as mudanças globais intensificam os processos fotoquímicos de formação do poluente.

Couto, Alves e Lesnik (2022) também contribuem ao destacar que “o ozônio troposférico, em níveis elevados de concentração, provoca impactos ao meio ambiente e à saúde humana” (p. 50), ressaltando que “as espécies químicas precursoras na formação do ozônio podem ser emitidas por fontes móveis ou estacionárias” (p. 52). Os autores enfatizam que “a maior variedade de compostos

químicos encontrados no ar, emitidos por indústrias e veículos, promove as reações fotoquímicas e tem como produto o ozônio troposférico” (p. 64), reforçando a complexidade da poluição atmosférica em áreas urbanas e industriais.

Rodrigues (2019), ao estudar a cidade de Uberlândia-MG, observou que “os maiores valores médios de concentração foram obtidos entre setembro e novembro ($53\text{--}60\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$)” (p. 16), enquanto “os menores valores médios foram identificados no período de maiores índices pluviométricos, em dezembro e janeiro ($30\text{--}39\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$)” (p. 17). O autor conclui que “a variabilidade diurna mostrou que os maiores picos de concentração ocorreram entre 12h e 15h, período de maior incidência de radiação solar” (p. 24), evidenciando a influência direta das condições meteorológicas sobre os níveis de ozônio (O_3).

MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza bibliográfica, fundamentada na análise de contribuições acadêmicas que abordam a formação, a concentração e os impactos do ozônio troposférico em diferentes contextos urbanos brasileiros. Foram utilizadas como referência pesquisas que empregaram distintas abordagens metodológicas, permitindo uma visão comparativa sobre o tema. É importante destacar que, por se tratar de um poluente secundário, sua análise requer a integração de métodos de monitoramento direto, especiação química de precursores e modelagem computacional.

O monitoramento das concentrações de ozônio nas áreas urbanas brasileiras fundamenta-se tanto em métodos automáticos de referência quanto em técnicas de amostragem passiva. Segundo as diretrizes vigentes da Resolução CONAMA 506/2024, o método oficial para a determinação do (O_3) permanece sendo a fotometria de absorção ultravioleta (UV), proporcional à quantidade de poluente na amostra (BRASIL, 2024).

Estudos como os de Bezerra (2023) e Silva (2019) utilizam a amostragem passiva para mapear a distribuição espacial em locais sem infraestrutura elétrica. Esse método baseia-se na difusão molecular, empregando filtros impregnados com índigo trissulfonato de potássio; a reação com o ozônio (O_3) promove o descolorimento do reagente, posteriormente quantificado por colorimetria ou espectrofotometria.

Inovações tecnológicas incluem ainda o uso de sistemas de baixo custo, baseados em plataformas Arduino e sensores de luminosidade (como o TSL2561), para validar medições fotométricas de forma acessível.

Alves e Alves (2019) utilizaram dados de monitoramento atmosférico obtidos em intervalos regulares na estação de Lamarão do Passé – BA, analisando concentrações de ozônio (O_3), NO e NO_2 em séries temporais. Chiquetto (2016) recorreu à modelagem atmosférica por meio do sistema WRF/Chem, simulando a distribuição espacial do ozônio troposférico na região metropolitana de São Paulo e relacionando-a ao uso do solo urbano. Meller (2021) desenvolveu análises físico-químicas em campo e laboratório, investigando a interação entre emissões urbanas de Manaus e compostos biogênicos da Floresta Amazônica para compreender a formação de aerossóis orgânicos secundários e ozônio (O_3).

Além desses trabalhos, da Silva e Corrêa (2025) aplicaram o modelo OZIPR (*Ozone Isopleth Package for Research*), um modelo lagrangeano de trajetórias utilizado para simular a formação do ozônio troposférico a partir de diferentes combinações de precursores (NO_x e COVs). Em conjunto com o mecanismo químico SAPRC, que reúne centenas de reações atmosféricas, o OZIPR permite calcular a escala de reatividade incremental (MIR), indicando o quanto cada composto orgânico contribui para a formação de ozônio (O_3). No estudo, os autores adaptaram essa escala à realidade brasileira, utilizando dados da Estação de Qualidade do Ar de Bangu – RJ.

Castelhano (2018), por sua vez, analisou séries históricas de dez anos de dados horários de NO_2 e ozônio (O_3) em Curitiba, aplicando o método estatístico de Theil-Sen, considerado robusto para séries temporais não normais e com variância de erro não constante. Esse procedimento permitiu identificar tendências de crescimento do ozônio (O_3) e decréscimo do NO_2 , relacionando-as às mudanças climáticas regionais e evidenciando a influência da temperatura e da radiação solar nos processos fotoquímicos de formação do poluente.

Para compreender a formação do ozônio, as fontes aplicam métodos rigorosos de especiação de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs). O Método TO-15 da EPA (2019) é amplamente citado, consistindo na coleta de amostras em *canisters* de aço inox, seguida de análise por Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria

de Massas (CG-EM). Essa técnica permite identificar os hidrocarbonetos mais reativos, como os aromáticos (BTEX) e o isopreno (SILVA, 2016).

Em cenários de pesquisa avançada, como o experimento GoAmazon relatado por Meller (2021), utiliza-se a Espectrometria de Massa por Reação de Transferência de Próton (PTR-MS) para a medição de COVs em tempo real, além de monitores de especiação química de aerossóis (ACSM) para compreender a interação entre poluentes urbanos e emissões biogênicas da floresta (MELLER, 2021). A dinâmica de transporte e a sensibilidade da formação do ozônio são avaliadas por modelos de qualidade do ar. Chiquetto (2016) e Meller (2021) utilizam o modelo WRF/Chem (*Weather Research and Forecasting with Chemistry*), que integra simultaneamente módulos de meteorologia e química atmosférica para simular a dispersão intraurbana e o impacto do uso do solo.

Outra abordagem envolve modelos de trajetória ou “caixa”, como o OZIPR, operando em conjunto com o mecanismo químico SAPRC (*Statewide Air Pollution Research Center*). Esses modelos são utilizados para calcular isópletas de ozônio, que indicam se a produção do poluente em uma área é limitada por NO_x ou por COVs, auxiliando na hierarquização da importância de cada precursor (SILVA, 2019).

Para lidar com a complexidade e a lacuna de dados históricos (dados faltantes), aplicam-se técnicas de Ciência de Dados. Oliveira (2022) demonstra a eficácia do algoritmo MissForest para a imputação de dados faltantes em séries temporais de qualidade do ar. Para a previsão das concentrações de ozônio (O_3), são empregados métodos de calibração multivariada e aprendizado de máquina, incluindo:

- Redes Neurais Artificiais (ANN) e Máquinas de Vetor de Suporte (SVM), para modelar relações não lineares;
- Florestas Aleatórias (RF) e Mínimos Quadrados Parciais (PLS);
- Análise de Componentes Principais (PCA) e Análise de Agrupamento (*Cluster*), para identificar regiões com padrões homogêneos de poluição.

Essas abordagens, somadas aos inventários de emissões de fontes móveis e fixas (como os do MMA, 2019), permitem que os estudos brasileiros alcancem elevado grau de precisão na interpretação dos episódios críticos de poluição fotoquímica.

A análise bibliográfica realizada neste artigo fundamenta-se em diferentes estudos, permitindo discutir de forma comparativa os principais resultados apresentados pelos autores. O enfoque recai sobre os mecanismos de formação do ozônio troposférico (O_3), suas concentrações em distintos contextos urbanos e os impactos associados tanto à saúde humana quanto ao equilíbrio ambiental.

RESULTADOS

A pesquisa reuniu estudos que contribuem para a compreensão da formação e da concentração do ozônio troposférico em diferentes contextos urbanos brasileiros. Os trabalhos analisados apresentam resultados que ampliam a discussão sobre os fatores que influenciam esse poluente secundário.

Chiquetto (2016) destaca: “As simulações indicaram que áreas de maior densidade urbana apresentaram concentrações mais elevadas de ozônio, reforçando a relação entre uso do solo e poluição fotoquímica” (p. 190). Esse resultado evidencia que a configuração urbana e a intensidade das atividades humanas exercem influência direta sobre os níveis de ozônio (O_3), reforçando a necessidade de políticas de planejamento territorial e controle das emissões.

De forma complementar, Meller (2021) observa: “os resultados mostraram que a interação entre poluentes urbanos e compostos biogênicos intensificou a formação de partículas secundárias e elevou os níveis de ozônio na atmosfera” (p. 120). A análise amplia a discussão ao demonstrar que, além das fontes antropogênicas, processos naturais também contribuem para a intensificação da poluição fotoquímica, especialmente em regiões de transição entre áreas urbanas e ecossistemas florestais.

Couto, Alves e Lesnik (2022) reforçam esse entendimento ao afirmar: “O ozônio troposférico em níveis elevados de concentração provoca impactos ao meio ambiente e à saúde humana” (p. 50). Os autores destacam ainda: “a maior variedade de compostos químicos encontrados no ar, emitidos por indústrias e veículos, promove as reações fotoquímicas e tem como produto o ozônio troposférico” (p. 64). Esses resultados evidenciam que a presença do poluente não se limita ao ambiente urbano, mas também se relaciona com áreas industriais, ampliando os riscos ambientais e sociais.

Rodrigues (2019), ao estudar a cidade de Uberlândia-MG, verificou: “os maiores valores médios de concentração foram obtidos nos meses entre setembro e novembro (53–60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)” (p. 16), enquanto “os menores valores médios foram identificados no período de maiores índices pluviométricos na cidade, em dezembro e janeiro (30–39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)” (p. 17). O autor conclui: “a variabilidade diurna mostrou que os maiores picos de concentração ocorreram entre 12h e 15h, período de maior incidência de radiação solar” (p. 24). Esses achados confirmam a influência direta das condições meteorológicas sobre os níveis de ozônio (O_3), demonstrando que fatores como radiação solar e precipitação modulam sua concentração.

Silva e Corrêa (2025) acrescentam uma dimensão química ao debate ao identificar: “O VOC que teve o maior impacto na formação de ozônio foi o 1,2,4-trimetilbenzeno, com 2,06 ppb (O_3) ppbC⁻¹ VOC” (p. 5). Esse resultado mostra que a composição específica dos compostos orgânicos voláteis presentes na atmosfera influencia significativamente a intensidade das reações fotoquímicas e, consequentemente, os níveis de ozônio (O_3).

Por fim, Castelhana (2018) evidencia a relação entre poluição e mudanças climáticas regionais ao observar: “Altos níveis de ozônio (O_3) apresentam íntima relação com valores de temperatura em ambientes urbanos. O calor age como acelerador do processo, desencadeando um aumento nos níveis do poluente” (p. 38). O autor defende que o crescimento do ozônio (O_3) em Curitiba, mesmo diante da redução de NO_2 , pode ser explicado pelas alterações na dinâmica climática regional, reforçando que as mudanças globais intensificam os processos fotoquímicos de formação do poluente.

Assim, os resultados apontam que a formação e a concentração do ozônio troposférico (O_3) são influenciadas por múltiplos fatores: densidade urbana e uso do solo, interações físico-químicas com emissões biogênicas, composição específica dos compostos orgânicos voláteis, condições meteorológicas e alterações climáticas regionais. Essa multiplicidade de variáveis revela a complexidade dos processos que determinam a presença do ozônio (O_3) na atmosfera e reforça a necessidade de estratégias integradas de monitoramento e controle.

CONCLUSÕES

Para compreender melhor as conclusões que podem ser extraídas desta pesquisa, apresentam-se a Tabela 1, a qual sintetiza os achados das fontes citadas sobre a realidade brasileira do ozônio (O_3).

Tabela 1 – Relação dos dados encontrados nas fontes sobre a realidade brasileira do ozônio troposférico (O_3)

Referência	Município/ Região	Zonas de Maior Incidência	Método Mais Utilizado / Maior Precisão	Relação com normativas (CONAMA 506/2024 - P-II: 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Chiquetto (2016)	RMSP	Background Urbano (Pico do Jaraguá) e Residencial.	Mais utilizado: Monitoramento Automático (CETESB). Maior precisão: Modelagem WRF/Chem.	Concentrações excedem frequentemente os limites de 140 e 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Silva (2019/2025)	RMRJ (Bangu)	Bangu, Irajá e Duque de Caxias (REDUC).	Mais utilizado: Canisters (EPA TO-15). Maior precisão: Modelagem OZIPR/SAPRC.	Bangu registra o maior número de violações; potencial de formação local é elevado
Meller (2021)	Manaus/AM	14 km vento abaixo do centro (Sítio T2).	Mais utilizado: Espectrometria de Massa (PTR-MS).	Embora a concentração dobre vento abaixo, os valores (~20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ acima do fundo) são baixos
Santos (2024)	Interior de SP	Paulínia, Americana e Piracicaba.	Maior precisão: Índice AOT40 para proteção da vegetação.	47 de 50 estações excederam valores de referência; diversas estações superam 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Bezerra (2023)	Rondonópolis/MT	Áreas arborizadas (UFR) e periferia.	Mais utilizado: Amostragem Passiva (Índigo). Precisão: Fotômetro Arduino	Picos de 83 ppb (~162 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) superam significativamente o limite P-II de 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Rodrigues (2019)	Uberlândia/MG	Terminal Central (Canyons Urbanos).	Mais utilizado: Monitor Portátil Aeroqual Série 200.	Concentração máxima de 84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ permanece abaixo do P-II e do Padrão Final
Oliveira (2022)	RMRJ	Adalgisa Nery, Vila São Luiz e Porto das Caixas.	Maior precisão: Machine Learning (Random Forest)	Registros de 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em VSL e PDC excedem o novo limite de 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Couto (2022)	Camaçari/BA	Área de influência do Polo Industrial.	Mais utilizado: Levantamento Bibliográfico Sintético.	Valores acima de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ violam o Padrão Final/OMS, aproximando-se do P-II

FONTE 1: AUTORES (2026)

Os resultados evidenciam que o ozônio troposférico nas áreas urbanas brasileiras não é homogêneo e segue a lógica de um poluente secundário. Diferentemente dos poluentes primários (CO, NO), cujas maiores concentrações ocorrem próximas às vias de tráfego, o ozônio (O_3) apresenta seus picos em zonas de *background* urbano, áreas residenciais e parques, como o Ibirapuera em São Paulo e Bangu no Rio de Janeiro. Isso ocorre devido ao fenômeno da titulação, no qual as altas emissões frescas de NO nos centros veiculares consomem o ozônio local para formar NO_2 , reduzindo sua concentração imediata (CHIQUELTO, 2016).

A análise metodológica revela que, embora o monitoramento automático por absorção UV seja a referência de precisão para órgãos reguladores (CONAMA/CETESB), a amostragem passiva e o uso de sensores de baixo custo (Arduino) têm se mostrado ferramentas essenciais para mapear a distribuição espacial em municípios sem redes oficiais, como Rondonópolis (BEZERRA, 2023). Além disso, técnicas modernas de Ciência de Dados (*Machine Learning*) permitem prever picos de ozônio (O_3) com 92% de precisão, auxiliando na gestão antecipada da saúde pública (OLIVEIRA, 2022).

Na Tabela 2 apresenta-se a relação das concentrações máximas apontadas nas fontes e seu status em comparação com o padrão normativo estabelecido pela Resolução CONAMA nº 506/2024.

Tabela 2 – Relação das concentrações máximas e o padrão normativo

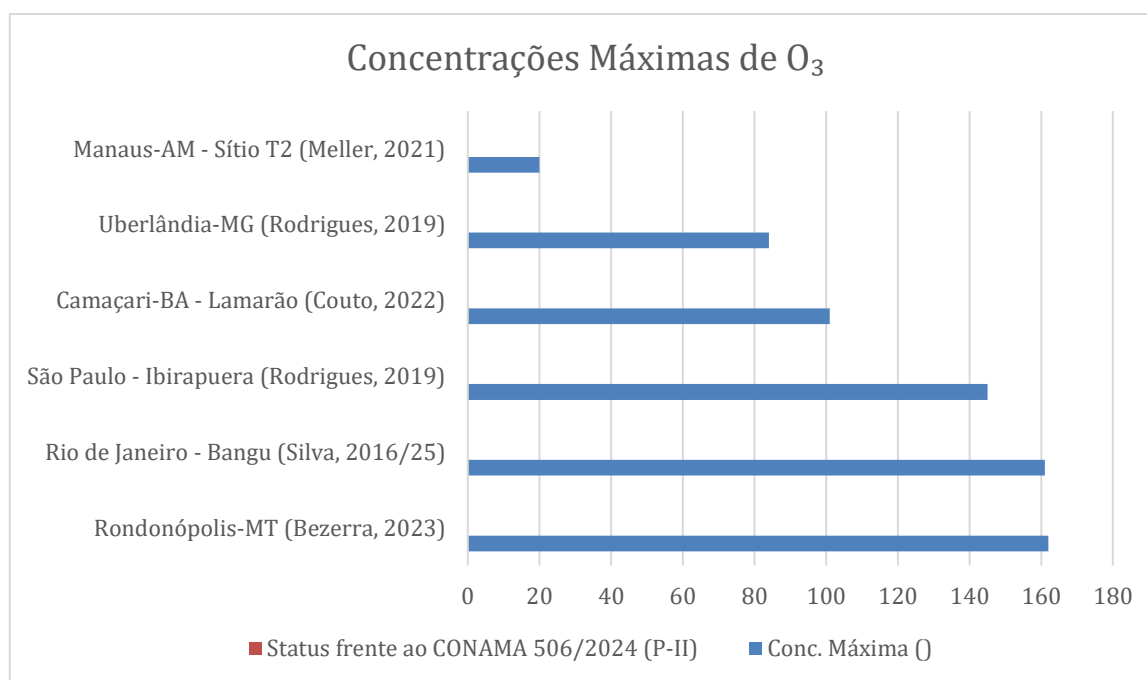
	Conc. Máxima ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Status frente ao CONAMA 506/2024 (P-II)
Rondonópolis-MT (Bezerra, 2023)	162	Ultrapassa
Rio de Janeiro - Bangu (Silva, 2016/25)	161	Ultrapassa
São Paulo - Ibirapuera (Rodrigues, 2019)	145	Ultrapassa
Camaçari-BA - Lamarão (Couto, 2022)	>100	Ultrapassa Apenas OMS
Uberlândia-MG (Rodrigues, 2019)	84	Dentro do Padrão
Manaus-AM - Sítio T2 (Meller, 2021)	~20 (acima do fundo)	Dentro do Padrão

FONTE 2: AUTORES (2026)

Sabe-se que o Padrão P-II da Resolução CONAMA 506/2024 é de $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (média móvel de 8 horas), enquanto o Padrão Final da OMS é de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (RODRIGUES, 2019). Para a visualização dos dados citados, apresenta-se o Gráfico

1, que relaciona as informações da Tabela 2 e evidencia que a maioria dos municípios analisados apresentou concentrações de ozônio (O_3) acima do padrão da OMS, e uma parcela significativa ultrapassou também o padrão estabelecido pelo CONAMA.

Gráfico 1 – Relação das concentrações máximas de ozônio troposférico (O_3)



FONTE 3: AUTORES (2026)

Os dados também fornecem informações sobre a qualidade dos métodos apresentados e, por isso, é possível realizar observações que permitem identificar medições mais precisas e auxiliar na escolha metodológica no que se refere à quantificação do ozônio (O_3). A Tabela 3 apresenta essa relação.

Tabela 3 – Observações sobre a precisão metodológica

Referência	Zonas de Maior Incidência	Método Utilizado	Observação sobre Precisão
Chiquetto (2016)	Parques e áreas residenciais (Pico do Jaraguá)	Monitoramento Automático e WRF/Chem	Alta precisão na simulação do transporte.
Oliveira (2022)	Porto das Caixas e Vila São Luiz	Aprendizado de Máquina (Random Forest)	92% de precisão na previsão de picos.
Santana (2019)	Centros urbanos com alta frota (SP e BH)	Amostragem Passiva (Kit AnaliseAr)	Eficaz para monitoramento simultâneo em 5 capitais.
Bezerra (2023)	Áreas arborizadas (UFR) e arredores	Fotômetro Arduino ("Homemade")	Resultados estatisticamente similares ao espectrofotômetro comercial.

Santos (2024)	Interior de SP (Ribeirão Preto/Araraquara)	Índice AOT40	Método preciso para avaliar impacto na vegetação.
Silva (2025)	Bangu (RMRJ)	Modelo OZIPR / SAPRC	Precisão ajustada para a realidade brasileira (Escala MIR).

FONTE 4: AUTORES (2026)

Os dados consolidados revelam que o ozônio troposférico (O_3) é o poluente que mais desafia as normativas brasileiras, com ultrapassagens frequentes mesmo após a atualização da Resolução CONAMA 506/2024. O fenômeno da titulação explica por que centros veiculares, como Pinheiros em São Paulo ou o Centro do Rio de Janeiro, apresentam menores índices em comparação a áreas verdes, como o Parque Ibirapuera ou o Vetor Oeste de Jundiaí, onde o monóxido de nitrogênio (NO) é menos abundante para consumir o ozônio formado (CHIQUELLO, 2016).

Metodologicamente, a amostragem passiva consolidou-se como o método mais utilizado em pesquisas acadêmicas devido ao baixo custo e à facilidade de instalação em zonas remotas. No entanto, a modelagem por *Random Forest* (aprendizado de máquina) e o uso de sensores de baixo custo, como os baseados em Arduino, despontam como ferramentas promissoras para maior precisão futura no gerenciamento em tempo real.

Com base nas conclusões das fontes, as estratégias para mitigação do ozônio troposférico (O_3) no Brasil devem focar em:

- Controle seletivo de precursores: Em megacidades como São Paulo, a formação de ozônio é frequentemente limitada por compostos orgânicos voláteis (COVs). Portanto, reduzir apenas as emissões de NO_x (diesel), sem controlar os hidrocarbonetos (gasolina/etanol), pode paradoxalmente aumentar as concentrações de O_3 .
- Reformulação de combustíveis: A adoção de gasolinas reformuladas com menor teor de aromáticos e olefinas é sugerida como medida paliativa, embora insuficiente por si só.
- Mobilidade urbana: Sugere-se o fortalecimento do transporte público e não motorizado, além da implementação de políticas de pedágio urbano ou restrição veicular em centros saturados, visando reduzir a carga total de precursores.

- Expansão do monitoramento: É urgente ampliar a rede de monitoramento para o interior e cidades de médio porte, considerando que a poluição é transfronteiriça e o ozônio formado nas capitais impacta a produtividade agrícola e florestal a quilômetros de distância.
- Atualização legislativa: Há necessidade de prazos peremptórios para a adoção dos padrões mais restritivos da Resolução CONAMA 506/2024 (Metas Intermediárias e Padrão Final), alinhando o Brasil às diretrizes da OMS, que estabelecem o limite de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

REFERÊNCIAS

ALVES, Luciano da Silva; ALVES, Lara Camila da Silva. Formação e concentração do ozônio troposférico no município de Lamarão do Passé – BA: estudo das transformações de NOx e os possíveis impactos à saúde humana. **Geama – Revista Científica de Ciências Ambientais e Biotecnologia**, Salvador, v. 5, n. 1, p. 30–35, abr. 2019.

BEZERRA, Walter Aparecido. **O ciclo do nitrogênio e os fluxos de gases traços na Amazônia Central**. 2023. Tese (Doutorado em Física) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Monitoramento da Qualidade do Ar: Relatório Nacional**. Brasília, DF: MMA, 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução de Padrões de Qualidade do Ar: propostas de redação para a 3ª Reunião Ordinária da Câmara Técnica de Qualidade Ambiental – 9/5/2024. Brasília, DF: MMA, 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 506, de 5 de julho de 2024. Dispõe sobre padrões nacionais de qualidade do ar. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 130, p. 104, 9 jul. 2024.

CASTELHANO, Francisco Jablinski. Ozônio troposférico e mudanças climáticas: evidências introdutórias em Curitiba/PR. **Revista de Geografia – PPGeo – UFJF**, Juiz de Fora, v. 8, n. 2, p. 35-43, 2018.

CHIQUELTO, Júlio Barboza. **A distribuição espacial da concentração de ozônio troposférico associada ao uso do solo na região metropolitana de São Paulo**. 2016. 292 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

COUTO, Elizabeth da Rocha; ALVES, Luciano da Silva; LESNIK, Verônica Dietrich. Ozônio troposférico e impactos ao meio ambiente e à saúde humana: uma abordagem

sintética da revisão da literatura. **Apoena Revista Eletrônica**, Salvador, v. 2, n. 5, p. 50–65, dez. 2022.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter**. Washington, DC: U.S. EPA, 2019. (EPA/600/R-19/188).

MELLER, Bruno Backes. **A formação de aerossóis orgânicos secundários através da interação físico-química de emissões urbanas de Manaus com emissões biogênicas da Floresta Amazônica**. 2021. 161 f. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

OLIVEIRA, Rafael Corrêa Gama de. **Previsão de ozônio troposférico na Região Metropolitana do Rio de Janeiro com base em técnicas de imputação de dados faltantes e calibração multivariada**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: UERJ, 2022.

PACHECO JÚNIOR, Edson. **Distribuição espacial do ozônio troposférico em Jundiá – SP, como subsídio a estudos de exposição da população**. 2018. 139 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018

RODRIGUES, Leonardo Borges. **Estudo da concentração de ozônio troposférico na cidade de Uberlândia-MG**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

SANTANA, Franciele Oliveira. **Contaminantes/poluentes atmosféricos gasosos em centros urbanos brasileiros: uma revisão sistemática**. 2019. 119 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2019.

SANTOS, Guilherme Costa. **Influência de parâmetros meteorológicos na variabilidade da concentração de ozônio na RMSP**. 2024. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

SILVA, Cleyton Martins da. **Estudo dos compostos orgânicos voláteis precursores de ozônio para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. 2016. 233 f. Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016

SILVA, Mauricio Soares da. **Caracterização físico-química de aerossóis e seus precursores gasosos em um sítio de floresta preservada na Amazônia**. 2019. Tese (Doutorado em Física) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

SILVA, Renan Alves; CORRÊA, Sergio Machado. Potencial de formação de ozônio na homologação veicular no bairro de Bangu, Rio de Janeiro. **Química Nova**, v. 48, n. 3, p. 1-11, 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Air Quality Guidelines Global Update 2005**: Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2006