

Estimativa dos custos à saúde associados às emissões de material particulado inalável para o município de Itabira, MG

O impacto da poluição atmosférica na saúde é um fato cada vez mais evidente. Neste sentido, este estudo apresentou uma estimativa dos custos à saúde pública associados à exposição de curto e longo prazo às concentrações de Material Particulado fino (MP_{2,5}) para o município de Itabira – MG, o qual abriga um dos maiores complexos mineradores a céu aberto do mundo. O software AirQ+, desenvolvido pela Organização Mundial de Saúde (OMS), foi utilizado para analisar o número de mortes prematuras por causas naturais e internações por doenças cardiovasculares e respiratórias atribuídas à exposição por MP_{2,5} no ano de 2019. Foram considerados os diferentes padrões de qualidade do ar estabelecidos pela Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 491 de 2018 e os recomendados pela OMS, com o objetivo de subsidiar os gestores públicos com informações que estimulem a adoção de padrões mais restritivos de qualidade do ar, promovendo melhoria da qualidade de vida da população. Os resultados mostraram que, no caso da adoção dos novos padrões recomendados pela OMS, 41 internações por doenças respiratórias, 28 internações por doenças cardiovasculares e 40 mortes prematuras de adultos maiores de 30 anos, poderiam ser evitadas. Além disso, pode-se verificar que existe um ganho imediato em relação à expectativa de vida em todas as idades quando os níveis de exposição ao MP_{2,5} são reduzidos, sendo que, há um ganho significativo a longo prazo especialmente na faixa etária dos idosos acima de 60 anos. Quando se considera a exposição a longo prazo, o potencial ganho econômico na redução de mortes prematuras é de 122.000.000 reais por ano.

Palavras-chave: Poluição atmosférica; Padrões de qualidade do ar; Expectativa de vida; Valor estatístico de uma vida.

Estimated health costs associated with emissions of inhalable particulate matter for the municipality of Itabira, MG

The increasingly evident impact of air pollution on health is a fact. In this sense, this study is an estimate of the public health costs associated with the exposure of fine Particulate Matter (PM_{2.5}) for the municipality of Itabira - MG, which is one of the largest open pit mining complexes of the world. The AirQ+ software, developed by the World Health Organization (WHO), was used to analyze the number of premature deaths from natural causes and hospitalizations for cardiovascular and respiratory diseases attributed to exposure to PM_{2.5} in the year 2019. Different air quality standards, established by the Resolution of the National Environment Council (CONAMA) No. 491 of 2018, and those recommended by the WHO, were considered with the aim of providing public managers with information that encourages the adoption of more restrictive air quality standards, promoting an improvement in the population's quality of life. The results showed that, if the new standards recommended by the WHO were adopted, 41 hospitalizations for respiratory diseases, 28 hospitalizations for cardiovascular diseases and 40 premature deaths of adults over 30 years old could be avoided. In addition, it can be seen that there is an immediate gain in life expectancy at all ages when levels of exposure to PM_{2.5} are reduced, and there is a significant long-term gain especially in the elderly age group above 60 years. When considering long-term exposure, the potential economic gain in reducing premature deaths is 122,000,000 brl per year.

Keywords: Air pollution; Air quality standards; Life expectancy; Value of a statistical life.


Topic: **Engenharia Ambiental**

Received: **14/10/2022**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Approved: **26/10/2022**

Rafael Vieira Bochini 
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7201404618588831>
<http://orcid.org/0000-0002-2376-3823>
bochinirafael1@gmail.com

Ana Carolina Vasques Freitas 
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4997501162611820>
<http://orcid.org/0000-0002-2633-2607>
ana.freitas@unifei.edu.br



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2022.010.0015

Referencing this:

BOCHINI, R. V.; FREITAS, A. C. V.. Estimativa dos custos à saúde associados às emissões de material particulado inalável para o município de Itabira, MG. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.13, n.10, p.177-191, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.010.0015>

INTRODUÇÃO

Segundo Fernandes (2017), um poluente atmosférico é um material proveniente de fontes naturais ou antropogênicas, que atinge “uma concentração onde se torna possível observar efeitos adversos à saúde ou bem-estar dos seres humanos, à vida das plantas e dos animais, e ainda à materiais de valor para a sociedade, resultando em alterações do equilíbrio ecológico e físico do planeta”.

Entre os dias 5 e 9 de dezembro de 1952 ocorreu um forte nevoeiro (denominado de *smog*) que encobriu a cidade de Londres devido a combinação de poluição atmosférica por fontes industriais com a queima de carvão para o aquecimento das casas por conta de uma forte frente fria. Neste período estima-se que 12.000 mortes ocorreram devido a doenças respiratórias e cardiovasculares, como resultado da ocorrência desse intenso *smog* (POTENZA, 2017).

Desde então, o número de estudos voltados a entender os efeitos da poluição atmosférica sobre a saúde pública tem crescido. Estima-se que a quantidade de mortes atribuídas a poluição atmosférica no ano de 2015 foi estimada em 8,8 milhões, ultrapassando as 7,2 milhões de mortes anuais causadas pelo cigarro (LELIEVELD et al., 2019). No Brasil, a poluição atmosférica causa em média cerca de 20 mil óbitos/ano segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), valor cinco vezes maior ao número de óbitos estimado pelo tabagismo passivo (SANTOS et al., 2019).

Nos meses iniciais do ano de 2020, ocorreu uma redução no fluxo de automóveis e a desaceleração das atividades industriais, por conta da pandemia do novo coronavírus (SAN MARTIN et al., 2020). Segundo a Agência de Energia Internacional (IEA, 2020), devido, principalmente, a queda no consumo de petróleo e carvão durante a pandemia, um milhão de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) deixaram de ser emitidos por dia, além de outros poluentes, o que resultou em uma melhora na qualidade do ar, especialmente nas regiões metropolitanas. No entanto, apesar deste aspecto positivo, a retomada das atividades após a pandemia, numa tentativa de recuperar as perdas econômicas, poderá resultar em um aumento expressivo nas emissões de poluentes, principalmente pelo setor industrial.

Segundo a Secretaria da Coalizão Clima e Ar Limpo do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, 2019), nos 15 países que mais emitem gases de efeito estufa estima-se que os impactos da poluição atmosférica na saúde custem mais de 4% de seu Produto Interno Bruto (PIB).

A longa exposição de seres humanos a poluentes presentes no ar pode resultar no desenvolvimento de doenças cardiorrespiratórias de forma prematura. A Figura 1 mostra as principais causas de óbitos atribuídas à poluição atmosférica no mundo no ano de 2019.

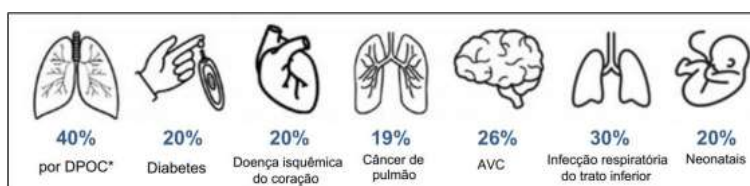


Figura 1: Percentuais das principais causas de morte atribuídas à poluição do ar, a nível global, no ano de 2019.

*Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC). **Fonte:** REIF (2020).

Um dos poluentes com maior impacto à saúde humana é o Material Particulado (MP). Este é

classificado pelo seu tamanho; sendo assim, o MP₁₀ se refere a partículas com diâmetro de até 10 µm; o MP_{2,5} às partículas com até 2,5 µm em diâmetro; e o MP_{0,1}, cujo diâmetro possui até 0,1 µm. O tamanho das partículas está diretamente relacionado ao nível de penetração no sistema respiratório humano, bem como ao seu tempo de residência na atmosfera.

Assim, o MP é constituído de uma mistura de partículas sólidas ou líquidas, suspensas no ar, de diferentes tamanhos e origens, que possui uma relação direta com problemas de saúde humana, principalmente as partículas de menor tamanho, podendo causar danos ao sistema respiratório e, em alguns casos, atingir também o sistema circulatório (BRITO et al., 2018).

Um estudo realizado em 5.565 cidades brasileiras no período de 2010 a 2016 encontrou que a exposição ao material particulado fino (MP_{2,5}) foi significativamente associada a várias mortalidades específicas, como câncer, incluindo oral, nasofaringe, esôfago e estômago, cólon retal, fígado, vesícula biliar, laringe, pulmão, osso, pele, mama feminina, colo do útero, próstata, cérebro e leucemia (YU et al., 2022). De acordo com os autores, nenhum nível seguro de exposição ao MP_{2,5} foi observado na curva de exposição-resposta para todos os tipos de câncer, sendo que a exposição a longo prazo aumentou os riscos de mortalidade para muitos tipos de câncer (YU et al., 2022). Segundo a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2021), o MP é cancerígeno, além de impactar o sistema cardiovascular e respiratório.

Além disso, a exposição ao MP_{2,5} em dia com alta poluição atmosférica está associada a um aumento no risco de ataques de asma e aumento no número de internações hospitalares por doenças cardíacas e pulmonares, ocorrência de derrames e ataques cardíacos, podendo, inclusive, prejudicar o crescimento pulmonar das crianças (BMJ, 2022). O resultado disso não são apenas mortes prematuras, mas mais anos vividos com problemas de saúde e maior o custo e a pressão sobre o sistema de saúde, que poderia ser evitado (BMJ, 2022).

O município de Itabira, localizado no Estado de Minas Gerais, possui em seu território um dos maiores complexos mineradores do mundo, o qual se encontra próximo às áreas residenciais da cidade. Assim, a baixa qualidade do ar, provocada, principalmente, pela atividade minerária, promove um aumento no número de casos por doenças respiratórias, em especial, em crianças e adolescentes, além de doenças cardiovasculares em idosos (GUIMARÃES et al., 2017).

Freitas et al. (2021) analisaram a composição química do MP em Itabira e encontraram que este é composto de enxofre, ferro e elementos como cobre, selênio, cromo, níquel, vanádio e chumbo, entre outros, sendo que as concentrações desses elementos são comparáveis às encontradas em grandes cidades metropolitanas brasileiras. Ademais, o cromo, níquel, chumbo e selênio são considerados elementos carcinogênicos em humanos e animais, mesmo que em pequenas concentrações (VENTER et al., 2017; ATSDR, 2015). Para garantir a proteção à saúde humana, a Resolução CONAMA n° 491 de 19 de novembro de 2018 regulamenta os padrões de qualidade do ar, os quais são divididos em padrões de qualidade do ar intermediários (PI-1, PI-2, PI-3), que devem ser cumpridos em etapas, e o padrão de qualidade do ar final (PF), definido pela OMS em 2005 como limite seguro.

Contudo, estes padrões de qualidade do ar devem ser periodicamente revisados, conforme surgem

novas evidências dos efeitos danosos da poluição atmosférica para a saúde humana. Assim, a OMS publicou no ano de 2021 a revisão dos padrões de qualidade do ar que haviam sido definidos em 2005, devido a crescentes evidências, obtidas por meio de estudos epidemiológicos, do aumento da incidência de câncer de pulmão associado aos níveis elevados de MP, por exemplo (WHO, 2021). Portanto, a OMS recomendou a redução das concentrações de alguns poluentes atmosféricos, como o MP, de forma a estabelecer uma faixa segura para garantir a saúde e o bem-estar da população (WHO, 2021).

Devido a esta redução proposta, o valor considerado seguro em termos de média anual do $MP_{2,5}$ passou de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e no caso da média diária (em 24 horas) passou de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. No caso do MP_{10} a redução na média anual foi de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e na diária de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Deve-se ressaltar que, atualmente, o município de Itabira adota o PI-1 da Resolução CONAMA 491 de 2018 como valores de referência para o controle e monitoramento da poluição atmosférica por MP. O PI-1 corresponde a $60 (120) \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $MP_{2,5}$ (MP_{10}) para a média diária e $20 (40) \mu\text{g}/\text{m}^3$ para a média anual.

Neste contexto, o presente trabalho propõe estimar os custos no sistema público de saúde associados à poluição do ar por exposição ao MP na cidade de Itabira – MG. Para isso, pretende-se responder aos seguintes questionamentos: Quantas internações por doenças respiratórias e cardiovasculares em Itabira (com relação ao total em 2019) podem ser atribuídas à exposição a curto prazo ao $MP_{2,5}$? Quantas mortes prematuras por causas naturais em Itabira poderiam ser evitadas se os padrões mais restritivos de qualidade do ar, recomendados pela OMS, fossem adotados no município? Quantos anos de vida são perdidos devido a morte prematura em decorrência da exposição a longo prazo ao $MP_{2,5}$? Qual a diminuição na expectativa de vida em decorrência da exposição a longo prazo ao $MP_{2,5}$?

Assim, por meio deste estudo, pretende-se entender a relação de mortes prematuras e internações por doenças cardiovasculares e respiratórias com a exposição ao $MP_{2,5}$, bem como avaliar a sensibilidade do método de estimativa do custo da poluição e o risco associado no município. Espera-se que este trabalho possa subsidiar os gestores públicos com informações que estimulem a adoção de padrões mais restritivos de qualidade do ar, promovendo melhoria da qualidade de vida da população.

METODOLOGIA

Área de estudo

O município de Itabira - MG está localizado a uma distância de 111 km a nordeste da capital mineira e situada na região sudeste do Brasil (Figura 2). Sua área territorial total é de $1253,704 \text{ km}^2$, além de possuir uma população com cerca de 121.717 pessoas.

Como mencionado anteriormente, Itabira faz parte de um grande complexo minerário a céu aberto, sendo a cidade berço da maior mineradora do Brasil. Marques et al. (2010) afirmaram que as populações que habitam o entorno dos complexos minerários e, assim, estão sob efeito da exploração mineral, sofrem com a degradação do solo, do relevo e o impacto visual na paisagem, bem como outros danos diversos associados

a estas atividades. O principal poluente emitido pelas atividades de mineração é o MP, que é lançado na atmosfera principalmente devido aos processos de escavação; uso de explosivos; movimentação de escavadeiras, tratores e caminhões; perdas nos transportes terrestre e ferroviário; fugas nas plantas de beneficiamento e pela ação dos ventos nos depósitos a céu aberto (SANTI et al., 2000).

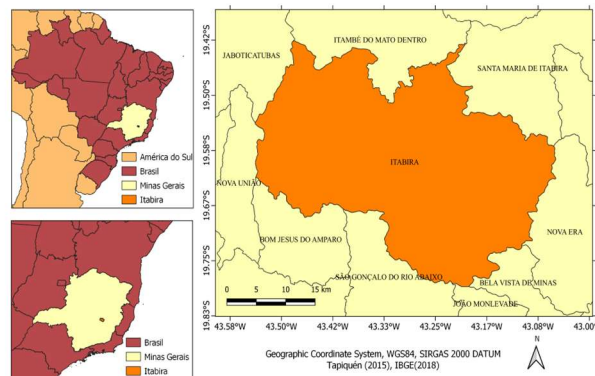


Figura 2: Mapa de Localização do município de Itabira - MG. **Fonte:** Freitas et al. (2021).

Dados da rede de monitoramento de qualidade do ar

O município de Itabira possui 4 Estações Automáticas de Monitoramento do Ar (EAMA11, EAMA21, EAMA31 e EAMA41) e uma Estação Meteorológica (EM11), que são mantidas pela companhia Vale S.A. (Figura 3). Dentre estas estações, 4 são destinadas a monitorarem apenas parâmetros de qualidade do ar, que são as partículas inaláveis grossas ($<10\mu\text{m}$ - MP_{10}), as partículas inaláveis finas ($<2,5\mu\text{m}$ - $\text{MP}_{2,5}$) e as partículas totais em suspensão ($<50\mu\text{m}$ - PTS). O monitoramento é contínuo com geração de médias horárias destes parâmetros durante 24 horas por dia. Estes dados diários foram utilizados neste estudo para o ano de 2019, tendo em vista que a partir do ano de 2020 ocorreu a pandemia Covid-19, que poderia, de alguma forma, influenciar nos resultados obtidos.

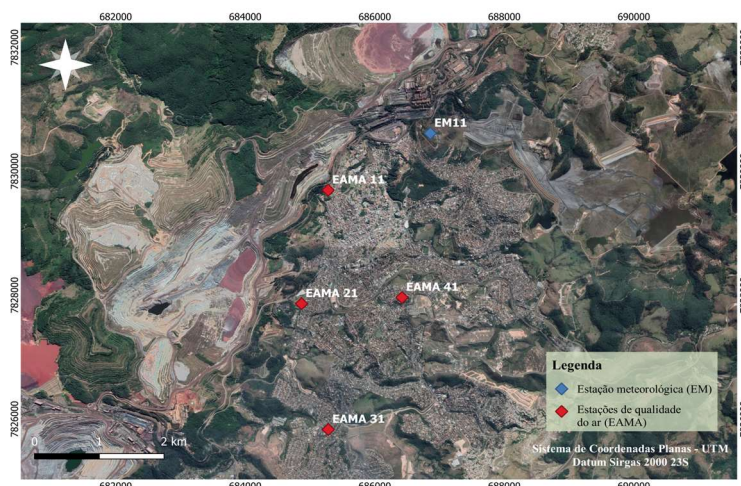


Figura 3: Localização das estações de monitoramento da qualidade do ar em Itabira. **Fonte:** ItabirAr (2022).

Como o $\text{MP}_{2,5}$ só passou a ser monitorado em Itabira em novembro de 2020, para obtenção dos valores de concentração deste poluente no ano de 2019 foi aplicado um fator de conversão. Para a obtenção deste fator de conversão utilizou-se as médias diárias de MP_{10} e $\text{MP}_{2,5}$ para o ano de 2021 e calculou-se a

razão diária $MP_{2,5}/MP_{10}$. Finalmente, calculou-se a média anual desta razão, obtendo-se o valor de 0,64, que é muito próximo do fator de conversão recomendado pela OMS. Deste modo, os dados diários de MP_{10} para o ano de 2019 foram multiplicados por 0,64 para obtenção da concentração média diária de $MP_{2,5}$. Esta conversão está associada a um erro médio anual de $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Dados de saúde

Os dados de óbitos por doenças cardiovasculares (respiratórias) foram obtidos a partir dos dados de óbitos por doenças do aparelho circulatório (respiratório), capítulo IX (X) da 10ª Classificação Internacional de Doenças (CID10), no site do Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS). Os dados do total de óbitos para o ano de 2019 foram subtraídos do total de óbitos por todas as outras causas externas para o município de Itabira-MG, de modo a obter o número de óbitos por causas naturais por local de residência.

Da mesma forma, os dados de internações hospitalares por doenças cardiovasculares (Capítulo CID-10: IX. Doenças do aparelho circulatório) e respiratórias (Capítulo CID-10: X. Doenças do aparelho respiratório) foram obtidos do DATASUS, considerando a morbidade hospitalar do SUS por local de residência no ano de 2019. Os dados de população residente também foram obtidos do DATASUS a partir do “Estudo de Estimativas Populacionais Por Município, Idade e Sexo 2000-2021 – Brasil”.

Software AIRQ+

O software AirQ+ foi desenvolvido pela OMS visando calcular os impactos à saúde associados à exposição aos poluentes atmosféricos mais relevantes em uma determinada população (WHO, 2019). A versão utilizada neste estudo foi a 2.1.1, lançada em maio de 2021, disponível para sistemas Linux e Windows. O software pode ser aplicado para análise de exposições a poluição atmosférica em curto e longo prazo.

Dessa forma, a estimativa do impacto na saúde humana diante da exposição ao $MP_{2,5}$ foi avaliada utilizando este software. Deve-se ressaltar que este estudo utilizou a metodologia descrita pela OMS, sendo que todos os cálculos realizados pelo AirQ+ são baseados em metodologias estabelecidas por vários estudos epidemiológicos e funções de concentração-resposta baseadas na revisão sistemática de todos os estudos disponíveis até 2013 (WHO, 2019).

O software calcula a proporção e o número atribuível de casos (mortes e internações) por 100 mil habitantes. Para quantificar a exposição ao MP, são necessários os seguintes dados de entrada: média anual para verificar os efeitos da exposição a longo prazo ou média diária para efeitos da exposição a curto prazo, dados da população em risco (por exemplo: o número total de adultos maiores de 30 anos de idade), valor de corte a ser considerado (por exemplo $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, conforme recomendado pela OMS), e o risco relativo se forem utilizados valores diferentes dos de referência.

Risco relativo

O Risco Relativo (RR) é uma forma de relacionar os níveis de concentração de poluição atmosférica

com complicações causadas na saúde pública. O RR indica o risco que uma pessoa tem de ser internada ou de ir à óbito por doenças do sistema circulatório e respiratório quando é exposta a diferentes níveis de poluição (OSTRO, 2004).

O software AirQ+ fornece a curva de risco relativo em função da concentração de MP. Assim, para calcular o número de internações por doenças respiratórias e cardiovasculares atribuídas à exposição do MP_{2,5}, foi utilizada a equação 1, segundo Camey et al. (2010); Oliveira et al. (2020):

$$NA = \frac{(RR-1)}{RR} \cdot N \quad \text{Eq.1}$$

Onde:

NA = o número de casos atribuídos à concentração do poluente analisado;

RR = o risco relativo de internações pela poluição;

N = o número de internações por doenças respiratórias, para todas as faixas etárias, no período analisado

Com base no número de internações associadas à exposição de curto prazo por MP_{2,5} (NA), foi estimado o custo dessa poluição por meio da multiplicação do valor médio da internação, obtido no DATASUS, pelo número de internações atribuíveis à poluição, como em Oliveira et al. (2020).

Anos de vida perdidos devido à morte prematura – YLL

O YLL (*Years of Life Lost* - anos de vida perdidos devido à morte prematura) fornece a soma dos anos individuais devido à mortalidade prematura por doenças atribuíveis à poluição do ar e seu cálculo pode ser ilustrado por meio da Equação 2. Através da multiplicação do número de mortes prematuras com o valor estatístico de uma vida (VSL), chega-se a uma estimativa dos custos associados.

$$YLL \text{ (Years of Life Lost)} = N \times L \quad \text{Eq.2}$$

Onde N é o número de mortes por ano e L representa a expectativa de vida na idade da morte em anos.

Valor estatístico de uma vida

O VSL (Valor Estatístico de uma Vida) é baseado na disposição a pagar da população para reduzir seu risco de morte devido à poluição do ar, sendo calculado a partir de uma adaptação da técnica de transferência de benefícios. O VSL mede o custo da mortalidade para a sociedade como um todo e permite que os governos avaliem o benefício social das ações que reduzam o risco de mortes prematuras.

Utilizando a base de dados de metanálise desenvolvida pela Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD, 2012), estima-se para o Brasil que o VSL associado à poluição do ar varie de R\$ 2,17 milhões a R\$ 3,93 milhões em valores de 2017 (ROCHA et al., 2019). Segundo a OECD (2012), para estimar o benefício anual de intervenções públicas, sugere-se aplicar o VSL médio para cada morte prematura prevenida em determinado ano, conforme a Equação 3:

$$VSL \times \text{n}^\circ \text{ de mortes} = \text{ganho econômico} \quad \text{Eq.3}$$

Com base nisso, o número de mortes prematuras associadas à exposição de longo prazo por MP_{2,5}, as quais poderiam ser evitadas (ou não), caso se adotasse (ou não) os padrões de qualidade do ar sugeridos pela OMS, foi estimado por meio do software AirQ+ e o benefício (custo) econômico disso foi calculado multiplicando este valor pelo VSL.

Análise de sensibilidade

Neste estudo foi feita uma análise para verificar se a adoção dos valores mais restritivos de $MP_{2,5}$, de acordo com o recomendado pela OMS como seguro, de fato pode estar associada a um aumento na expectativa de vida. Isso foi realizado por meio da aplicação do teste qui-quadrado, com o cálculo do p -valor, que indica o grau de confiabilidade dos dados encontrados, assim como feito no estudo de Al-Hemoud et al. (2018).

Nesta análise considerou-se a expectativa de vida para três faixas etárias (adultos maiores do que 30 anos, idosos maiores que 60 anos e todas as faixas etárias) em um cenário atual e considerando a projeção para os anos de 2020, 2030, 2040 e 2050 em um cenário onde o município adote valores mais restritivos para a média anual de $MP_{2,5}$.

Finalmente, aplicou-se o teste qui-quadrado para a faixa etária dos adultos maiores do que 30 anos, o que permitiu verificar se existe uma diferença estatisticamente significativa entre a expectativa de vida no cenário atual (PI-1 da resolução CONAMA 491/2018) e no cenário de adoção dos padrões mais restritivos (PF novo).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Histórico de emissões

Para efeito de comparação, os gráficos 1 e 2 mostram a concentração média diária do MP_{10} e $MP_{2,5}$ para a média das 4 estações de monitoramento da qualidade do ar ao longo dos últimos 11 anos em Itabira, levando-se em consideração os padrões intermediários (PI-1, PI-2, PI-3) e final (PF) previstos na Resolução CONAMA N°491 e o novo parâmetro final (PF novo) definido pela OMS no ano de 2021.

Pode-se notar no Gráfico 1, com relação às médias diárias, que durante todo o período analisado da série histórica a emissão de MP_{10} não ultrapassou o segundo padrão intermediário (PI-2). Já no caso do $MP_{2,5}$ ocorreram ultrapassagens em somente 7 dias durante os 12 anos analisados quando se considera o PI-2, correspondendo a um total de aproximadamente 0,16% (Gráfico 2).

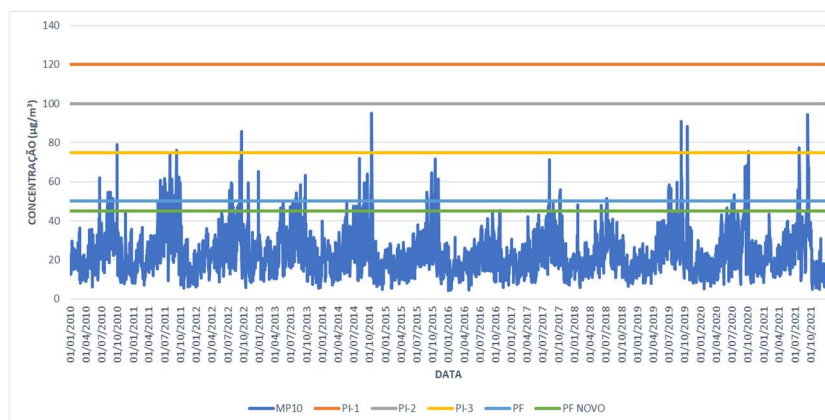


Gráfico 1: Concentração média diária de MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de 2010 a 2021.

Os Gráficos 3 e 4 a seguir mostram a concentração média anual do MP_{10} e $MP_{2,5}$ para a média das 4 estações de monitoramento da qualidade do ar ao longo dos mesmos últimos 12 anos em Itabira, levando-

se em consideração os padrões previstos para as médias anuais na Resolução CONAMA N°491 e o PF novo definido pela OMS em 2021.

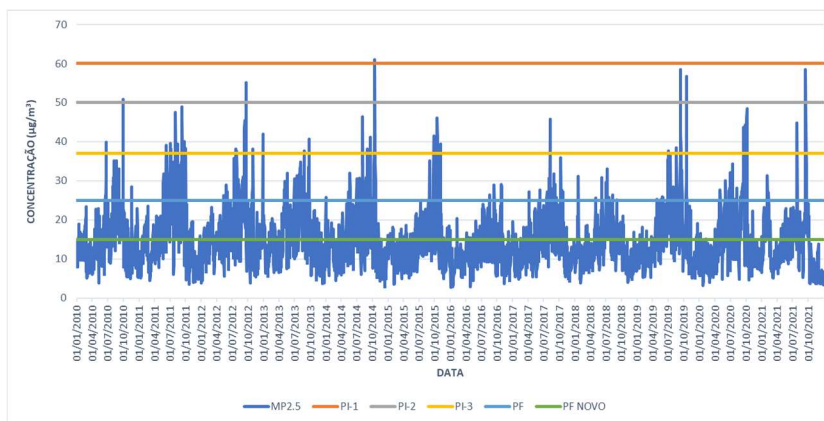


Gráfico 2: Concentração média diária de MP_{2,5} (µg/m³) no período de 2010 a 2021.

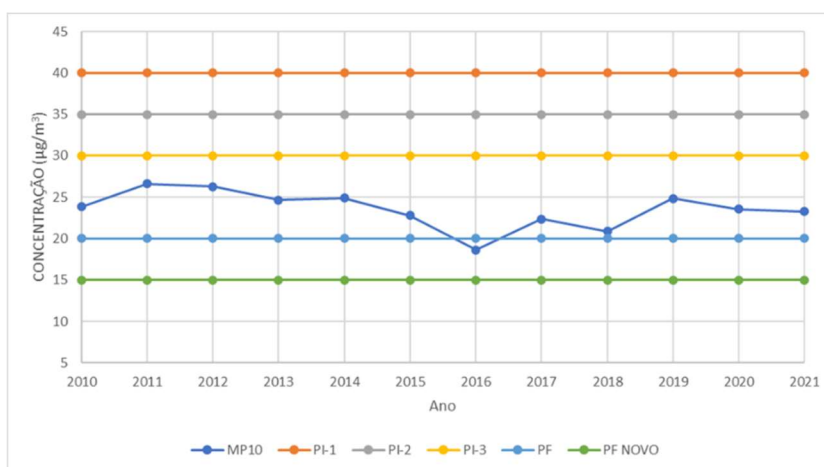


Gráfico 3: Concentração média anual de MP₁₀ (µg/m³) no período de 2010 a 2021.

No Gráfico 3 pode-se verificar que a média anual do MP₁₀ atingiu sua concentração mais baixa no ano de 2016, ficando abaixo da marca de 20 µg/m³ e voltando a atingir a marca dos 25 µg/m³ no ano de 2019, diminuindo ligeiramente nos anos seguintes. Com relação à média anual do MP_{2,5} nos últimos 11 anos (Gráfico 4), pode-se notar que o ano de 2016 foi também o que atingiu a menor concentração, tendo um ligeiro aumento ao longo dos últimos 5 anos em relação a 2016. Nos dois casos, nota-se que as concentrações médias anuais se mantêm abaixo do segundo padrão intermediário (PI-2) em todo o período analisado.

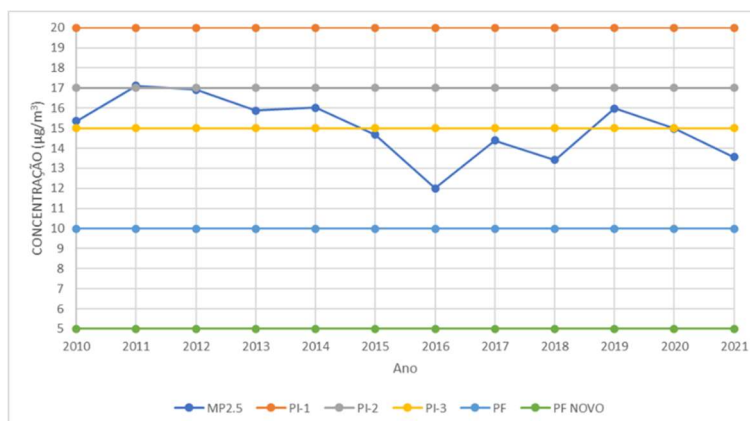


Gráfico 4: Concentração média anual de MP_{2,5} (µg/m³) de 2010 a 2021.

Internações atribuídas à exposição a curto prazo

Na Tabela 1 é apresentado o número de internações por doenças respiratórias segundo os dados do DATASUS, o risco relativo obtido por meio do AirQ+ e o número de casos atribuídos à exposição de curto prazo ao MP_{2,5} no ano de 2019 (calculado conforme equação 1).

Tabela 1: Número de internações por doenças respiratórias, risco relativo e número de casos atribuídos pela exposição de curto prazo do MP_{2,5} em 2019.

Concentração média diária MP _{2,5} (µg/m ³)	Número de internações (média diária)	Risco Relativo (intervalo de confiança)	Número de casos atribuídos (intervalo de confiança)
15 (PF novo)	652 (1,79)	1,02 (1,00 ; 1,04)	12 (0 ; 25)
60 (PI-1)	652 (1,79)	1,09 (1,00 ; 1,19)	53 (0 ; 106)
50 (PI-2)	652 (1,79)	1,07 (1,00 ; 1,15)	42 (0 ; 84)

Pode-se notar que a média diária de internações por doenças respiratórias para o ano de 2019 foi de 1,79, o que corresponde a 652 internações ao longo do ano (Tabela 1). Levando-se em consideração o PF novo, 12 internações são atribuídas à exposição do MP, enquanto para o PI-1 e PI-2 são atribuídas 53 e 42 internações, respectivamente. Isto quer dizer que 41 internações por doenças respiratórias poderiam ser evitadas caso o município adotasse o PF novo como padrão para o MP_{2,5} ao invés do PI-1.

Na Tabela 2 é apresentado o número de internações por doenças cardiovasculares, o risco relativo e o número de casos atribuídos à exposição de curto prazo no ano de 2019 ao MP_{2,5}.

Tabela 2: Número de internações por doenças cardiovasculares, risco relativo e número de casos atribuídos pela exposição de curto prazo do MP_{2,5} em 2019.

Concentração média diária MP _{2,5} (µg/m ³)	Número de internações (média diária)	Risco Relativo (intervalo de confiança)	Número de casos atribuídos (intervalo de confiança)
15 (PF novo)	894 (2,45)	1,0091 (1,00 ; 1,02)	8 (2 ; 15)
60 (PI-1)	894 (2,45)	1,042 (1,01 ; 1,08)	36 (0 ; 106)
50 (PI-2)	894 (2,45)	1,032 (1,01 ; 1,06)	28 (0 ; 84)

Em relação às doenças cardiovasculares (Tabela 2), o número de internações ao longo do ano e a média diária são maiores, quando se compara com as doenças respiratórias. Por outro lado, o número de casos atribuídos é menor e a diferença entre a adoção do PI-1 para o PF novo é igual a 28 internações, as quais representam aquelas que poderiam ser evitadas caso o município adotasse o padrão mais restritivo.

Mortes atribuídas à exposição a longo prazo

Quando a análise se refere a exposição a longo prazo, o foco muda de internações para óbitos prematuros atribuídos (Tabela 3). O software utilizado neste trabalho realiza a simulação de mortes prematuras por causas naturais atribuídas à exposição por MP_{2,5} para pessoas acima de 30 anos, o que corresponde a um total de 70.436 pessoas da população total de Itabira. Os parâmetros de média anual definidos para exposição a longo prazo são mais restritivos. A Tabela 3 mostra o número de casos atribuídos para o PF e o PF novo estabelecido no ano de 2021 pela OMS.

Considerando-se o PF da Resolução CONAMA 491, 22 mortes prematuras poderiam ser evitadas se este fosse o parâmetro adotado, o que corresponde a 3,49% do total das 635 mortes por causas naturais. Em

um cenário em que o PF novo fosse adotado, 40 mortes prematuras de pessoas maiores de 30 anos poderiam ser evitadas, o que corresponderia a 6,35% do total.

Tabela 3: Mortes prematuras evitadas para pessoas maiores de 30 anos em 2019.

Concentração média anual MP _{2,5}	Mortes prematuras evitadas (intervalo de confiança)	% do Total (intervalo de confiança)
10 µg/m ³ (PF)	22 (15 ; 29)	3,49 (2,29 ; 4,60)
5 µg/m ³ (PF novo)	40 (27 ; 53)	6,35 (4,19 ; 8,33)

Anos de vida perdidos (YLL)

O número total de YLL é obtido pela soma dos anos individuais devido à mortalidade prematura por doenças atribuíveis à poluição do ar. A Tabela 4 mostra os anos de vida que poderiam não ter sido perdidos em cada período de forma cumulativa, levando-se em consideração o risco relativo para o cenário de adoção ao PF novo.

Tabela 4: Anos de vida perdidos tendo como referência o PF novo.

YLL >= 30 anos	PF novo 5 µg/m ³
YLL para o ano de 2019	19,80
YLL para o ano de 2020	59,14
YLL após 10 anos	2.329,40
YLL após 20 anos	8.342,84
YLL após 50 anos	42.555,88
YLL após 100 anos	100.630,55

Entre os anos de 2019 e 2020, 59,14 anos poderiam não ter sido perdidos de forma prematura por conta de a expectativa de vida ter sido reduzida devido à poluição atmosférica se o PF novo estivesse em vigor desde 2019. Nos 10 anos seguintes a previsão é de um total de 2.329,40 anos de vida que não seriam perdidos, se o PF novo estabelecido pela OMS tivesse sido adotado, o qual determina uma concentração média anual de 5 µg/m³ para o MP_{2,5}.

Diminuição da expectativa de vida

Com relação à expectativa de vida, leva-se em consideração o tempo de exposição ao MP_{2,5} e o ganho no tempo de vida quando se adota o PF (10 µg/m³) ou o PF novo (5 µg/m³). A Tabela 5 apresenta estes resultados.

Tabela 5: Expectativa de vida para o PF e o PF novo.

Expectativa de vida	5 µg/m ³ (PF novo)	10 µg/m ³ (PF)
Ao nascer (nível atual)	79,5 anos (954,3 meses)	79,5 anos (954,3 meses)
Ao nascer (nível de referência)	80,2 anos (962,8 meses)	79,9 anos (958,9 meses)
Diferença/Ganho	0,7 anos (8,6 meses)	0,4 anos (4,6 meses)
Aos 65 anos (nível atual)	20,2 anos (242,4 meses)	20,2 anos (242,4 meses)
Aos 65 anos (nível de referência)	20,8 anos (249,1 meses)	20,5 anos (246,1 meses)
Diferença/Ganho	0,6 anos (6,7 meses)	0,3 anos (3,6 meses)
Perda média na expectativa de vida para população maior de 30 anos por morte atribuída	13,2 anos (158,8 meses)	13,1 anos (156,7 meses)
Número de casos atribuídos a exposição no primeiro ano	40	22

Pode-se verificar que, para recém-nascidos, a expectativa de vida, levando-se em consideração o nível atual de concentração do $MP_{2,5}$, é de 79,5 anos. Quando se considera o PF e o PF novo nota-se um ganho de 0,4 e 0,7 anos, respectivamente. Para pessoas com 65 anos ou mais, a expectativa de vida atual se encontra na faixa de 20,2 anos. Quando o PF é adotado há um ganho de 0,3 anos. Já no caso da adoção do PF novo o ganho é de 0,6 anos (Tabela 5).

Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada considerando-se a projeção da expectativa de vida para os anos de 2020, 2030, 2040 e 2050, como feito no estudo de Al-Hemoud et al. (2018). A diferença entre os anos de vida considerando-se o cenário atual em 2019 e a adoção do padrão mais restritivo (PF novo) foi calculada para três faixas etárias (maiores de 30 anos, idosos maiores de 60 anos, e para todas as idades) em todos os anos considerados, sendo esta diferença representada como sendo o ganho na expectativa de vida. Após isto, foi aplicado o teste qui-quadrado e obtido o p-valor. Por meio do Gráfico 4 pode-se notar que há um importante efeito a longo prazo em relação ao ganho da expectativa de vida para os próximos anos quando se adota o padrão mais restritivo.

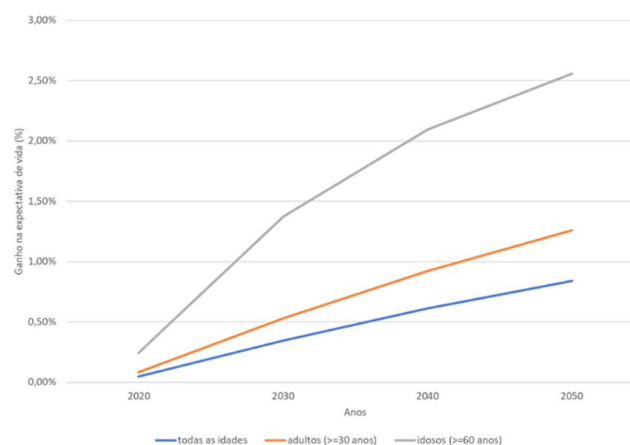


Gráfico 5: Aumento da expectativa de vida (%) de acordo com três faixas etárias.

Para a faixa etária dos idosos maiores de 60 anos nota-se um ganho na expectativa de vida extremamente significativo, ultrapassando a marca de 2,5% para o ano de 2050 quando a concentração do $MP_{2,5}$ permanece dentro dos padrões recomendados pela OMS. Apesar das outras faixas etárias não atingirem taxas tão altas como a dos idosos, é perceptível que o efeito a longo prazo proporciona um ganho na expectativa de vida para a população geral.

A aplicação do teste qui-quadrado para os adultos maiores do que 30 anos mostrou que o somatório dos anos de vida nos dois cenários é significativamente diferente um do outro, indicando que a expectativa de vida para os adultos maiores que 30 anos deve aumentar mais por conta da redução nos níveis de exposição ao $MP_{2,5}$.

Valor estatístico de uma vida

Por meio dos dados fornecidos pela OEDC (2012), calcula-se que o VSL médio é de R\$3,05 milhões

(valor médio entre R\$ 2,17 milhões a R\$ 3,93 milhões). Quando se multiplica esse valor pelo número de mortes prematuras que poderiam ter sido evitadas, caso o município adotasse o PF novo (concentração média anual de $MP_{2,5}$ não excedendo $5 \mu g/m^3$), é obtido o valor correspondente ao potencial ganho econômico por ano. Portanto, tem-se que o VSL vezes o número de mortes prematuras evitadas ($3,05 \times 10^6 \times 40$) é igual a R\$ 122.000.000 por ano.

Este é o potencial ganho econômico na redução do risco de mortes prematuras, por conta da redução nos níveis de exposição à longo prazo ao $MP_{2,5}$, ao se atingir os padrões mais restritivos, considerando a disposição da sociedade em pagar pelos benefícios. Tendo em vista que o orçamento da Secretaria Municipal de Saúde de Itabira no ano de 2022 foi de R\$ 190.206.757, observa-se que este potencial ganho corresponderia a 64% do orçamento total para este ano.

Custo de internação

Foi realizado um levantamento do valor total dos custos dos serviços hospitalares para internações por doenças do aparelho circulatório e respiratório para o ano de 2019. De acordo com os dados do DATASUS, o custo médio por internação no caso de doenças cardiovasculares (respiratórias) é de R\$ 2.284,69 (R\$ 1.526,38).

Assim, pode-se multiplicar estes custos médios para cada internação atribuída à exposição de curto prazo por $MP_{2,5}$, conforme encontrado anteriormente, levando-se em consideração a diferença entre o PI-1, que é o padrão atual de qualidade do ar na cidade de Itabira-MG, e o parâmetro final novo recomendado pela OMS em 2021 (PF novo).

Portanto, ao multiplicarmos o valor médio gasto para doenças respiratórias por 41 obtemos o valor de R\$ 62.581,58. Da mesma forma, para as doenças cardiovasculares, multiplica-se o valor médio por 28, obtendo-se o valor de R\$ 63.971,31, que resulta em um total de R\$ 126.552,90, que representa o custo anual de internações associadas à poluição atmosférica por $MP_{2,5}$ em Itabira para o ano de 2019.

Deve-se ressaltar que, além do custo de doenças e internações, o prejuízo que a poluição atmosférica pode resultar é ainda maior quando consideramos que durante o tempo de internação a pessoa fica incapacitada de trabalhar e gerar valor para a sociedade.

CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma estimativa dos custos associados à exposição a curto e longo prazo ao $MP_{2,5}$ para o município de Itabira-MG, utilizando o software AirQ+ da OMS, visando fornecer subsídios para que o município possa adotar padrões mais restritivos para a melhoria da qualidade do ar e conseqüentemente, da qualidade de vida da população.

Por meio da metodologia utilizada analisou-se o número de óbitos e internações atribuídas à exposição ao $MP_{2,5}$, considerando-se os diferentes padrões de qualidade do ar estabelecidos pela Resolução CONAMA 491 de 2018 e os recomendados pela OMS, podendo-se, assim, estimar quantas mortes prematuras poderiam ser evitadas se fossem adotados os padrões de emissão mais restritivos.

Os resultados obtidos mostraram que o município, embora esteja atualmente adotando o primeiro padrão intermediário (PI-1), na prática já poderia estar adotando o segundo padrão intermediário (PI-2), uma vez que as médias diárias de MP₁₀ não ultrapassam este padrão e no caso do MP_{2,5} ocorreram somente 7 ultrapassagens nos 12 anos analisados. Já com relação à média anual do MP₁₀ e do MP_{2,5} não ocorreram ultrapassagens do PI-2.

No caso da adoção dos padrões recomendados pela OMS em 2021, os resultados mostraram que 41 internações por doenças respiratórias, 28 internações por doenças cardiovasculares e 40 mortes prematuras de adultos maiores de 30 anos, poderiam ser evitadas.

A análise de sensibilidade permitiu verificar que existe um ganho imediato em relação à expectativa de vida em todas as idades quando os níveis de exposição ao MP_{2,5} são reduzidos. Além disso, há um ganho significativo a longo prazo na expectativa de vida, especialmente na faixa etária dos idosos acima de 60 anos.

Quando se considera a exposição a longo prazo ao MP_{2,5}, o potencial ganho econômico na redução de mortes prematuras é de R\$ 122.000.000/ano, considerando a disposição da sociedade em pagar pelos benefícios, o que representa 64% do orçamento da Secretaria Municipal de Saúde de Itabira no ano de 2022.

Já quando se considera a exposição a curto prazo, o potencial ganho econômico na redução do número de internações por doenças respiratórias e cardiovasculares seria de R\$ 126.552,90 para o ano de 2019.

Por fim, os resultados deste estudo apontam a necessidade da adoção de padrões mais restritivos de qualidade do ar, aliado a uma melhoria no monitoramento das emissões de MP em Itabira e a adoção de estratégias para o controle dessas emissões, tendo em vista os potenciais ganhos em relação a expectativa de vida a longo prazo e a melhoria na qualidade de vida a curto prazo através de um meio ambiente equilibrado, direito previsto na constituição federal. Ademais, estas iniciativas têm o potencial de reduzir os custos de saúde pública, bem como diminuir a pressão sobre o sistema de saúde.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos-ProfÁgua, projeto CAPES/ANA AUXPE nº 2717/2015, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), à Agência Nacional de Águas (ANA) e à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) - Campus Itabira.

REFERÊNCIAS

AL-HEMOUD, A.; GASANA, J.; AL-DABBOUS, A. N.; AL-SHATTI, A.; AL-KHAYAT, A.. Disability Adjusted Life Years (DALYs) in Terms of Years of Life Lost (YLL) Due to Premature Adult Mortalities and Postneonatal Infant Mortalities Attributed to PM_{2.5} and PM₁₀ Exposures in Kuwait. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v.15, n.11, 2609, 2018. DOI: <http://doi.org/10.3390/ijerph15112609>

ATSDR. **Toxicological Profiles**. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2015.

BMJ. **Air pollution is a public health emergency**. 378:o1664, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1136/bmj.o1664>

BRITO, G. F. S.; SODRÉ, F. F.; ALMEIDA, F. V.. O Impacto do Material Particulado na Qualidade do Ar. *Revista Virtual de Química*, v.10, n.5. p.1-21, 2018. DOI: <http://doi.org/10.21577/1984-6835.20180092>

CAMEY, S. A.; AGRANONIK, M.; RADAELLI, J.; HIRAKATA, V. N.. Fração Atribuível Populacional. *Revista do Hospital das Clínicas de Porto Alegre*, v.30, n.1, p.77-85, 2010.

FERNANDES, A. R.. **Análise da qualidade do ar e preocupações com a saúde**. Porto, 2016. 80 p Dissertação (Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia

Universidade do Porto (FEUP), Porto, 2017.

FREITAS, A. C. V.; BELARDI, R.; BARBOSA, H. M. J.. Characterization of particulate matter in iron ore mining region of Itabira, Minas Gerais, Brazil. *ATMÓSFERA*, v.52987, p.1-42, 2021. DOI: <http://doi.org/10.20937/ATM.52987>

GUIMARÃES, C. L.; MILANEZ, B.. Mineração, impactos locais e os desafios da diversificação: revisitando Itabira. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, Juiz de Fora, v.41, p.236, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v41i0.49360>

IEA. International Energy Agency. The impacts of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO2 emissions. *Global Energy Review*, 2020.

ITABIRAR. **Boletim Interpretativo da qualidade do ar**. Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Itabira – MG, v.2, n.5, 2022.

LELIEVELD, J.; KLINGMÜLLER, K.; POZZER, A.; PÖSCHL, U.; FNAIS, M.; DAIBER, A.; MÜNZEL, T.. Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions. *European Heart Journal*, v.40, n.20, p.1590–1596, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz135>

MARQUES, R. J.; BAPTISTA, E. M. C.. Estudo preliminar da degradação por mineração: o caso do município de Timon-MA. In: SIMPÓSIO DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA, 10; SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UESPI, 9. *Anais*. Teresina, 2010.

OECD. Organisation For Economic Co-Operation And Development. **Mortality risk valuation in environment, health, and transport policies**. Paris: OECD, 2012.

OLIVEIRA, J.; PAIVA, R.; REIS, M.; GÓIS, G. Air pollution and hospital admissions for respiratory diseases in Volta Redonda/RJ. *Brazilian Journal of Environmental Sciences*, v.55, n.1, p.72-88, 2020. DOI: <http://doi.org/10.5327/Z2176-947820200642>

OSTRO, B.. Outdoor air pollution: Assessing the environmental burden of disease at national and local levels. World Health Organization, Protection of the Human Environment, Geneva. *Environmental Burden of Disease Series*, n.5, 2004.

POTENZA, A.. **In 1952 London, 12 000 people died from smog—here’s why that matters now**. The Verge, 2017.

REIF, A.. **Estimativa dos custos associados às emissões de Material Particulado Inalável (MP10) para o município de**

Florianópolis/SC. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

ROCHA, G.; MORAIS, R. L.; KLUG, L.. **O custo econômico da poluição do ar**: Estimativa de valor da vida estatística para o Brasil. Texto para Discussão, n.2517. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2019.

SAN MARTIN, M. C.; SAN MARTIN, M. C.. Impactos iniciais da covid-19 no estado do Rio Grande do Sul. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, Boa Vista, v.2, n.4, p.60–71, 2020. DOI: <http://doi.org/10.5281/zenodo.3749844>

SANTI, A. M. M.; SUZUKI, R. Y.; OLIVEIRA, R. G.. Monitoramento da qualidade do ar no município de Itabira, MG: avaliação dos resultados em anos recentes (1997/99) e das perspectivas de modernização da rede de monitoramento no contexto do licenciamento ambiental corretivo da CVRD. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27. *Anais*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000. p.1-12.

SANTOS H. L.; FIALHO, M. L.; REIS, K. P.; FRANCO, M. V.; OLIVEIRA, R. B.. Relação entre poluentes atmosféricos e suas consequências para a saúde. *Revista Intraciência*, Guarujá, v.17, p.1-24, 2019.

UNEP. United Nations Environment Programme. Climate & Clean Air Coalition. **UN urges governments to act on climate and air pollution for health’s sake**. UNEP, 2019.

VENTER, A. D.; VAN ZYL, P. G.; BEUKES, J. P.; JOSIPOVIC, M.; HENDRICKS, J.; VAKKARI, V.; LAAKSO, L.. Atmospheric trace metals measured at the regional background site (Welgegund) in South Africa. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v.17, p.4251-4263, 2017. DOI: <http://doi.org/10.5194/acp-17-4251-2017>

WHO. World Health Organization. Regional Office for Europe, European Centre for Environment and Health. **AirQ+**: software tool for health risk assessment of air pollution. Bonn: WHO Regional Office for Europe, 2019.

WHO. World Health Organization. **WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide**. Bonn: WHO, 2021.

YU, P.; XU, R.; LI, S.; COELHO, M. S. Z. S.; SALDIVA, P. H. N.; SIM, M. R.; ABRAMSON, M. J.; GUO, Y.. Associations between long-term exposure to PM2.5 and site-specific cancer mortality: A nationwide study in Brazil between 2010 and 2018, *Environmental Pollution*, v.302, n.119070, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119070>

Os autores detêm os direitos autorais de sua obra publicada. A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detêm os direitos materiais dos trabalhos publicados (obras, artigos etc.). Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas ou digitais sob coordenação da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.