



Ministério da Saúde

FIOCRUZ
Fundação Oswaldo Cruz



ESCOLA NACIONAL DE SAÚDE PÚBLICA
SERGIO AROUCA
ENSP

Lucas de Oliveira do Couto

**A influência do material particulado fino na saúde das populações de municípios do
entorno do Complexo Industrial e Portuário do Pecém**

Rio de Janeiro

2019

Lucas de Oliveira do Couto

**A influência do material particulado fino na saúde das populações de municípios do
entorno do Complexo Industrial e Portuário do Pecém**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saúde Pública e Meio Ambiente da Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca, na Fundação Oswaldo Cruz, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências na Área de Saúde Pública e Meio Ambiente e área de concentração de Gestão e Saneamento Ambiental.

Orientador: André Reynaldo Santos Périssé
Coorientadora: Karen dos Santos Gonçalves

Rio de Janeiro

2019

Catálogo na fonte
Fundação Oswaldo Cruz
Instituto de Comunicação e Informação Científica e Tecnológica em Saúde
Biblioteca de Saúde Pública

C871i Couto, Lucas de Oliveira do.
A influência do material particulado fino na saúde das populações de municípios do entorno do Complexo Industrial e Portuário do Pecém / Lucas de Oliveira do Couto. -- 2019.
100 f. : il. color. ; mapas ; tab.

Orientador: André Reynaldo Santos Périssé.

Coorientadora: Karen dos Santos Gonçalves.

Dissertação (mestrado) – Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Rio de Janeiro, 2019.

1. Material Particulado. 2. Poluentes Atmosféricos. 3. Poluentes Industriais – efeitos adversos. 4. Poluentes Ambientais – efeitos adversos. 5. Doenças Respiratórias. 6. Meio Ambiente. 7. Mortalidade. 8. Métodos Epidemiológicos. 9. Análise Espaço-Temporal. I. Título.

CDD – 23.ed. – 363.739209813

Lucas de Oliveira do Couto

**A influência do material particulado fino na saúde das populações de municípios do
entorno do Complexo Industrial e Portuário do Pecém**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saúde Pública e Meio Ambiente da Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca, na Fundação Oswaldo Cruz, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências na Área de Saúde Pública e Meio Ambiente e área de concentração de Gestão e Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 23/05/2019

Banca Examinadora

Dr(a). Beatriz Fátima Alves de Oliveira
Fundação Oswaldo Cruz - Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca

Dr(a). Adriana Gioda
Pontifícia Universidade Católica do Rio – Departamento de Química

Dr André Reynaldo Santos Périssé (orientador)
Fundação Oswaldo Cruz – Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca

Rio de Janeiro

2019

AGRADECIMENTOS

À Maria Luzia, Silda e Thaís, todas as minhas conquistas são fruto do amor e dedicação do vocês!

Aos meus orientadores André Périssé e Karen Gonçalves por toda paciência, conhecimento transmitido e principalmente confiança que depositaram em mim para a realização deste trabalho. Vocês me receberam de braços abertos e foram muito importantes no desenvolvimento deste projeto que me enche de orgulho, muito obrigado!

Às pesquisadoras Sandra Hacon, Beatriz Oliveira, Adriana Gioda, Sharmênia Nuto, Elvira Maciel e Andréa Sobral que contribuíram neste caminho até a conclusão do trabalho.

Aos amigos, colegas, parentes, professores e pesquisadores que contribuíram para que eu chegasse até este ponto da minha jornada acadêmica.

À Secretaria da Saúde do Estado do Ceará pela concessão de dados para pesquisa

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa durante o período do Mestrado.

RESUMO

A poluição atmosférica é um dos maiores problemas ambientais da atualidade. O material particulado da moda fina ($MP_{2,5}$) é mais associado aos desfechos em saúde devido sua capacidade de penetrar mais profundamente no sistema respiratório. Os piores impactos do $MP_{2,5}$ podem ser observados nas áreas de aglomeração industrial devido a diversidade de elementos emitidos de origem industrial que podem potencializar os efeitos tóxicos das partículas suspensas nestas regiões. Com isso, o monitoramento da concentração ambiental do $MP_{2,5}$ em áreas amplamente industrializadas e que dividem espaços com ambientes habitados é importante. Esta pesquisa inicialmente estimou a concentração do $MP_{2,5}$ através da profundidade óptica do aerossol coletada por satélite em três áreas de influência (Ais) do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP). Posteriormente analisou-se a relação entre as concentrações estimadas e os óbitos por doenças do aparelho respiratório (DAR) ocorridos nestas áreas aplicando um modelo aditivo generalizado (MAG) e estimando a variação percentual do risco relativo de óbito por DAR associado ao incremento de $10\mu\text{g m}^{-3}$ de $MP_{2,5}$, no período de 2006 a 2017. As Ais abrangeram os municípios de São Gonçalo do Amarante (Ai I), Paracuru e Paraipaba (Ai II) e Caucaia (Ai III) localizados no Estado do Ceará. Em todas as Ais, a média anual estimada de material particulado não ultrapassou o valor estabelecido pela legislação nacional (média anual inferior a $10\mu\text{g m}^{-3}$) em nenhum dos anos de estudo, apesar de existirem dias com médias diárias superiores a $25\mu\text{g m}^{-3}$. O material particulado nas Ais se comportou de maneira sazonal, com maiores concentrações nas estações da primavera e verão. Neste mesmo período há também uma direção preferencial dos ventos que sugere um movimento predominante destas partículas do sentido leste para oeste. As taxas de óbito foram crescentes em todas as áreas de influência, com destaque para o período de 2011 a 2017, que foi o mais significativo para este estudo, a significância estatística da variável $MP_{2,5}$ nos modelos (MAG) foi observada em todas as Ais somente neste período, e a amplitude da variação percentual do risco relativo de óbito por DAR foi maior também neste período.

Palavras-chave: Material particulado fino, poluição atmosférica, doenças do aparelho respiratório, complexo industrial, empreendimentos industriais, profundidade óptica do aerossol

ABSTRACT

Air pollution is one of the biggest environmental problems today. Fine fashion particulate matter ($PM_{2.5}$) is more associated with health outcomes because of its ability to penetrate deeper into the respiratory system. The worst impacts of $PM_{2.5}$ can be observed in the industrial agglomeration areas due to the diversity of emitted elements of industrial origin that can potentiate the toxic effects of suspended particles in these regions. Thus, monitoring the $PM_{2.5}$ environmental concentration in widely industrialized areas that share spaces with inhabited environments is important. This research initially estimated the concentration of $MP_{2.5}$ through the aerosol optical depth collected by satellite in three areas of influence (Ais) of the Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP). Subsequently, the relationship between estimated concentrations and deaths from Respiratory Tract Diseases (RTD) occurring in these areas was analyzed by applying a generalized additive model (GAM) and estimating the percentage change in relative risk of death due to RTD associated with an increase of $10\mu\text{g m}^{-3} PM_{2.5}$, from 2006 to 2017. The Ais covered the municipalities of São Gonçalo do Amarante (Ai I), Paracuru and Paraipaba (Ai II) and Caucaia (Ai III) located in the state of Ceará. In all Ais, the estimated annual average of particulate matter did not exceed the value established by national legislation (annual average of less than $10\mu\text{g m}^{-3}$) in any of the years of study, although there are days with daily averages greater than $25\mu\text{g m}^{-3}$. Particulate matter behaved seasonally in all Ais, with higher concentrations in the spring and summer seasons. In this same period there is also a preferential wind direction which suggests a predominant movement of these particles from east to west. Death rates were increasing in all areas of influence, with emphasis on the period 2011-2017, which was the most significant for this study, the statistical significance of variable $PM_{2.5}$ in the models (GAM) was observed only in this period for all Ais, and the amplitude of the percentage change in the relative risk of death from RTD was greater also in this period.

Keywords: fine particulate matter, air pollution, respiratory tract diseases, industrial complex, aerosol optical depth

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Demarcação da área do CIPP e destaque dos Municípios sob sua influência. Estado do Ceará, Brasil.	37
----------	---	----

Artigo 01

Figura 1	Destaque da localização do CIPP, suas áreas de influência e do Porto do Pecém. Estado do Ceará, Brasil	61
Figura 2	Distribuição das médias de concentração de MP _{2,5} por estações do ano. Municípios de Paracuru, Paraipaba, São Gonçalo do Amarante e Caucaia. Estado do Ceará, Brasil. Período: 2006 a 2017.	64
Figura 3	Rosa de poluição do município de Caucaia. Estado do Ceará, Brasil. Período: 2006 a 2015.	65
Figura 5	Rosa de poluição do município de São Gonçalo do Amarante. Estado do Ceará, Brasil. Período: 2006 a 2015	66

Artigo 02

Figura 1	Destaque da localização do CIPP, suas áreas de influência e do Porto do Pecém. Estado do Ceará, Brasil.	83
Figura 2	Sumario da distribuição temporal das concentrações diárias estimadas de material particulado fino nos municípios de Paracuru, Paraipaba, São Gonçalo do Amarante e Caucaia. Estado do Ceará, Brasil. Período: 2006 a 2017	84
Figura 3	Boxplot da variação percentual do risco relativo de óbito por DAR associado ao incremento de 10 µg m ⁻³ de MP _{2,5} . Área de influência I, II, III, Estado do Ceará, Brasil. Período: de 2006 a 2010 e 2011 a 2017.	88

APÊNDICE A

Figura 1	Sumario da distribuição temporal das concentrações diárias estimadas de material particulado fino e seus respectivos dados de AOD nos municípios de Paracuru, Paraipaba, São Gonçalo do Amarante e Caucaia. Estado do Ceará, Brasil. Período: 2006 a 2017	100
----------	---	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Padrões de qualidade do ar.	25
----------	-----------------------------	----

Artigo 01

Tabela 1	Resumo estatístico das estimativas diárias de MP _{2,5} em cada área de influência do CIPP. Estado do Ceará, Brasil. Período: 2006 a 2010, e 2011 a 2017.	62
Tabela 2	Resumo estatístico dos dados meteorológicos diários para cada área de influência do CIPP. Estado do Ceará, Brasil. Período: 2006 a 2010, e 2011 a 2017.	62
Tabela 3	Correlação de Pearson entre as concentrações estimadas diárias de MP _{2,5} estimadas e variáveis meteorológicas	63

Artigo 02

Tabela 1	Contagem de óbitos por doenças do aparelho respiratório (DAR), população residente e taxa bruta de mortalidade por 100.000 habitantes. Área de influência I, II, III. Estado do Ceará, Brasil. Período: 2006 a 2010, e 2011 a 2017.	85
Tabela 2	Descritivo do Modelo GAM. Área de influência I, II, III. Estado do Ceará, Brasil. Período: 2006 a 2010.	86
Tabela 3	Descritivo do Modelo GAM. Área de influência I, II, III. Estado do Ceará, Brasil. Período: 2011 a 2017.	87
Tabela 4	Resumo da variação percentual do risco relativo de óbito por DAR associado ao incremento de 10 µg m ⁻³ de MP _{2,5} . Área de influência I, II, III. Estado do Ceará, Brasil. Períodos de 2006 a 2010 e 2011 a 2017.	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIC	Critério de Informação de Akaike
AOD	Aerosol Optical Depth
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CGIAE	Coordenação-Geral de Informações e Análises Epidemiológicas
CID	Classificação Estatística Internacional de Doenças e Problemas Relacionados com a Saúde
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
COEMA	Conselho Estadual de Meio Ambiente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
CSP	Companhia Siderúrgica do Pecém
D.O.E	Diário Oficial do Estado
DATASUS	Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde
DO	Declaração de Óbito
DPOC	Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica
DRC	Doença Respiratória Crônica
EPA	Agência de Proteção Ambiental
EIA/RIMA	Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GIOVANNI	Geospatial Interactive Online Visualization and Analysis Infrastructure
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MAG	Modelo Aditivo Generealizado
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
MP	Material particulado
NASA	National Aeronautics and Space Administration

OMM	Organização Meteorológica Mundial
OMS	Organização Mundial da Saúde
PCD	Plataforma de Coleta de Dados – meteorológicos e agrometeorológicos
PNMA	Política Nacional de Meio Ambiente
PRONAR	Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar
RR	Risco Relativo
SEMACE	Secretaria do Meio Ambiente do Ceará
SIH-SUS	Sistema de Informação Hospitalar do SUS
SIM	Sistema de Informação sobre Mortalidade
SINDA	Sistema Integrado de Dados Ambientais
SIS	Sistema de informação de Saúde
SUS	Sistema Único de Saúde
UV	Ultra Violeta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	DESENVOLVIMENTO REGIONAL E A INDUSTRIALIZAÇÃO.....	16
2.1.1	O complexo industrial e portuário do Pecém (CIPP)	18
2.2	POLUIÇÃO, QUALIDADE DO AR E IMPACTOS AMBIENTAIS.....	21
2.3	ATMOSFERA E COMPORTAMENTO DOS POLUENTES.....	26
2.4	PRINCIPAIS POLUENTES ATMOSFÉRICOS	28
2.4.1	Monóxido de carbono	28
2.4.2	Óxido de enxofre	28
2.4.3	Óxido de nitrogênio	29
2.4.4	Material particulado (MP_x)	29
2.5	IMPACTOS A SAÚDE DO MATERIAL PARTICULADO.....	31
3	JUSTIFICATIVA	34
4	OBJETIVOS	35
4.1	OBJETIVO GERAL.....	-
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	-
5	MATERIAIS E MÉTODOS	36
5.1	DELINEAMENTO E POPULAÇÃO DO ESTUDO.....	36
5.2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	36
5.2.1	Área de Influência I - São Gonçalo do Amarante	38
5.2.2	Área de influência II – Paracuru e Paraipaba	39
5.2.3	Área de influência III – Caucaia	40
5.3	ESTIMATIVA DE MATERIAL PARTICULADO (MP _{2,5}).....	41
5.3.1	Coleta de dados de AOD	42
5.3.2	Coleta de dados metrológicos	43
5.3.3	Modelo de previsão do MP_{2,5}	43
5.4	COLETA DE DADOS DE MORTALIDADE.....	44
5.4.1	Registros de informação de óbito	45
5.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	46
5.5.1	Estatística descritiva.....	46
5.5.2	Incremento percentual do risco relativo.....	46

5.6	CONSIDERAÇÕES ÉTICAS.....	48
6.0	RESULTADOS	49
6.1	ARTIGO 01	50
	INTRODUÇÃO	51
	MATERIAIS E MÉTODOS	53
	RESULTADOS	56
	DISCUSSÃO	57
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
	FIGURAS E TABELAS	61
	REFERENCIAS	67
6.2	ARTIGO 02	70
	INTRODUÇÃO	71
	MATERIAIS E MÉTODOS	73
	RESULTADOS	76
	DISCUSSÃO	78
	CONCLUSÕES	82
	FIGURAS E TABELAS	83
	REFERENCIAS	90
7	CONCLUSÕES.....	92
	REFERENCIAS	93
	APÊNDICE A	100

1 INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica representa uma grande ameaça à saúde pública em todo o mundo. Somente no Brasil, o número de óbitos atribuídos a poluição atmosférica ultrapassou os 66 mil óbitos em 2017. Dentre os diferentes poluentes existentes, o material particulado (MP) com diâmetro inferior a $2,5\mu\text{m}$ ($\text{MP}_{2,5}$) merece grande atenção devido sua capacidade de penetração no sistema respiratório, podendo se acumular nos pulmões ou até ultrapassar a barreira respiratória chegando ao sistema circulatório. Em 2017 foram atribuídos ao $\text{MP}_{2,5}$ 50.300 óbitos no Brasil, o que representa 76% do número de óbitos atribuídos a poluição do ar no país (66.200 óbitos em 2017) (HEALTH EFFECTS INSTITUTE, 2019).

O $\text{MP}_{2,5}$ se refere a uma classe de poluentes que pode ser emitido diretamente na atmosfera ou se formar através de gases precursores. Consiste em partículas sólidas e líquidas suspensas no ar e não apresentam uma estrutura molecular fixa (FRUMKIN, 2016). As fontes de emissão do $\text{MP}_{2,5}$ são múltiplas, tanto de origem natural quanto antrópica. As emissões antrópicas incluem, processos industriais, fontes veiculares, queima de combustíveis industriais, queima de matéria orgânica e geração de energia termelétricas (GANEM, 2015). Desta maneira, a composição das partículas em suspensão é variada e depende da fonte de emissão podendo conter substâncias orgânicas, metais, compostos de enxofre e outras substâncias inorgânicas perigosas (FRUMKIN, 2016).

Além da complexidade da composição físico-química comum aos MPs, as frações menores ($\text{MP}_{2,5-0,1}$) estão mais associadas aos desfechos em saúde que as maiores, devido a capacidade destas partículas atingirem regiões mais inferiores do sistema respiratório. A exposição ao $\text{MP}_{2,5}$ está associada a processos inflamatórios das vias respiratórias, declínio da função pulmonar, exacerbação de casos de asma e doença pulmonar obstrutiva crônica, diminuição da capacidade imune dos pulmões, morbimortalidades cardiovasculares e baixo peso ao nascer (RÜCKERL, 2011; THURSTON et al, 2017).

Mesmo com inúmeras evidências dos efeitos adversos dos poluentes atmosféricos e a contribuição dos processos industriais em sua emissão, o governo federal do Estado do Ceará optou por políticas de desenvolvimento regional que apostam na atração de empreendimentos industriais para reduzir disparidades locais. Para isso, os governos em nível local e federal direcionam recursos financeiros e de infraestrutura para uma determinada região e iniciam um processo de atratividade de investimentos privados (CAVALCANTE, 2009; MONASTERIO, 2009).

Na região metropolitana de Fortaleza, estado do Ceará, o Complexo Industrial e

Portuário do Pecém (CIPP) foi consequência de tais políticas desenvolvimentistas. O complexo abriga dezenas de indústrias que incluem fábricas de cimento, fertilizantes, siderurgia e termelétrica. Estes empreendimentos ocupam uma área de mais de 100km² dos municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante localizados na região metropolitana de Fortaleza, CE (CEARÁ, 2013).

O entorno do complexo industrial é rodeado por áreas residenciais, escolas, estabelecimentos comerciais, unidades de saúde, entre outros, de maneira que existem diversos indivíduos expostos às emissões do complexo. Além disso, uma característica importante desta região é o comportamento dos ventos, o que propicia a mobilidade das partículas emitidas por entre as diferentes áreas de estudo e, inclusive, o aporte de MP proveniente de outras regiões para as áreas de estudo.

Desta forma, o objetivo desta pesquisa é estimar a concentração de material particulado (MP_{2,5}) nas áreas de influência do CIPP, que correspondem aos municípios de Paracuru, Paraipaba, São Gonçalo do Amarante e Caucaia, e analisar a associação entre concentração do MP_{2,5} estimado e os óbitos por doenças do aparelho respiratório.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 DESENVOLVIMENTO REGIONAL E A INDUSTRIALIZAÇÃO

O espectro das desigualdades regionais no país é bastante amplo e marcante. As desigualdades regionais brasileiras se formaram e vem evoluindo desde a tomada dos territórios indígenas e segue até hoje com o desenvolver histórico da economia e sociedade (BRANDÃO, 2019).

Visando combater tais desigualdades o art. 3º da Constituição Federal de 1988, em seu inciso III destaca a redução das disparidades regionais como um dos objetivos fundamentais da República Federativa do Brasil. Ainda, o artigo 43 do texto da constituição, estabelece que, para efeitos administrativos, a União poderá atuar em uma região específica com o intuito de promover o seu desenvolvimento e reduzir as disparidades locais. Isso garante ao Governo Federal instrumentos para o fomento de políticas, programas, entre outras medidas que busquem o equilíbrio entre as diferentes regiões do país (BRASIL, 1988; CAVALCANTE, 2014).

É importante destacar que o motivo para que o governo atue em determinadas regiões se deve ao fato de que na ausência de incentivos fiscais, financeiros e de investimentos em infraestrutura, as atividades econômicas tendem a se localizar em regiões mais propícias, onde suas atividades possam ocorrer de maneira mais fluida e sustentável possível (BEZERRA, 2010; IPEA, 2017). Tal tendência de aglomeração pode ser interrompida, se políticas de incentivo forem implementadas de forma suficiente para direcionar os investimentos para estas áreas menos favorecidas (CAVALCANTE, 2008; CAVALCANTE; UDERMAN, 2009; MONASTERIO, 2009).

Com relação ao governo do Ceará, além dos incentivos ao turismo e agronegócios o desenvolvimento industrial é visto como principal caminho para o crescimento da região (BEZERRA, 2010). Na gestão de Virgílio Távora (1963 a 1966), já existia nos planos de Governo do Estado do Ceará, a intenção de investir recursos na criação de distritos industriais e na infraestrutura necessária à industrialização regional. Todos estes esforços em investir na indústria, em teoria, têm como objetivo atrair investimentos produtivos que sejam capazes de romper com o ciclo pobreza e desigualdades regionais (VASCONCELOS et al, 1999; CEARÁ, 2003; RIGOTTO, 2004).

Dentre os projetos desta diretriz desenvolvimentista voltada para a industrialização e urbanização no Ceará, surgiu o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP). O CIPP

é um projeto estratégico de governo contemplado no Plano de Desenvolvimento Sustentável do Ceará (1995-1998), que buscava a alocação de investimento privado para o complexo industrial e arredores (CEARÁ, 2013).

Em se tratando de atração de indústrias e criação de novos empregos formais, as políticas parecem ter causado um efeito positivo (SILVA; QUEIROZ, 2009). Porém, a distribuição territorial destes empreendimentos pelo Estado não foi tão homogênea quanto se esperava. Estudos demonstraram que houve uma maior concentração da oferta de empregos na região metropolitana de Fortaleza (PONTES et al, 2006; PAIVA, 2010). Em 2010, 67% dos postos de trabalho formais criados pela indústria estavam na região metropolitana (CAVALCANTE et al., 2010 apud SILVA-FILHO, 2014, p110).

É importante destacar que o processo de aglomeração de diferentes empreendimentos industriais em uma área relativamente restrita, como é o caso do CIPP, pode contribuir com o aumento dos riscos ambientais na região. Podem ocorrer derramamentos, vazamentos, emanções não controladas, contaminações ambientais por conta da emissão de poluentes atmosféricos, de efluentes e da geração de resíduos sólidos industriais. Tudo isso com consequências para a saúde da população local (RIGOTTO; 2009; TYLER MILLER; SPOOLMAN, 2012^a; TYLER MILLER; SPOOLMAN, 2012^b).

Além de todos estes riscos inerentes às atividades industriais é importante destacar que grandes empreendimentos e complexos industriais por vezes podem contribuir para aumentar os riscos socioambientais de determinadas populações. Em 2018, foi publicado pela fundação australiana de conservação (uma organização ambiental) que 90% das indústrias australianas estão situadas em subúrbios de renda baixa a média e que menos de 0.1% das indústrias poluidoras estão localizadas próximo aos bairros mais ricos (ACF, 2018). Alves (2013) observa um cenário semelhante no município de Cubatão (SP), onde um terço da população do município vive em aglomerado subnormais (favelas) que também estão em áreas de alto risco ambiental. Em ambos os casos, a migração de pessoas em busca de emprego, a desvalorização das terras próximas destes empreendimentos e a dificuldade das populações locais em se protegerem destes riscos (inclusive do ponto de vista legal), são alguns dos fatores que contribuem para que as populações mais pobres estejam mais próximas destas áreas industrializadas e sejam, conseqüentemente, mais afetadas (ALVES, 2013; ACF,2018).

2.1.1 O Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP)

A instalação do CIPP é resultado de uma das iniciativas do poder público do Estado do Ceará para a atração de investimentos privados. (RIGOTTO, 2004; BEZERRA, 2010). O processo de licenciamento do complexo se iniciou em 1995 quando a Secretaria de Transportes, Energia, Comunicação e Obras solicitou a Licença Prévia à Secretaria do Meio Ambiente do Ceará (Semace). Já no ano seguinte (1996) o Estudo e o Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) é entregue a Semace que no mesmo ano, emite um parecer favorável à instalação do CIPP (Parecer Técnico nº. 88/96 Semace). A Licença Instalação é concedida de acordo com a Resolução nº3, Coema (CEARÁ, 2013).

Em 1997, o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA), interviu no processo, pois se observou que o licenciamento do empreendimento era de competência federal. Com isso, o IBAMA emitiu uma licença de instalação autorizando a instalação do complexo (LI nº. 24/97). No mesmo ano foi publicado um decreto no diário oficial do estado que tornava toda a região do CIPP e seu entorno de utilidade pública para efeito de desapropriação. Somente no ano de 2002, o Complexo Portuário do Pecém é finalmente inaugurado (CEARÁ, 2013).

O CIPP está instalado a aproximadamente 60km do município de Fortaleza e as vias de acesso são a BR - 222 ou as rodovias CE - 85, 421 e 156. A área do complexo ocupa uma extensão de 133,37km², na qual aproximadamente 71km² estão no Município de Caucaia (53%) e aproximadamente 63km² estão no Município de São Gonçalo do Amarante (47%). Estes municípios estão enquadrados na Área de Influência Direta do CIPP (CEARÁ, 2009).

O complexo está equipado com uma área de instalações portuárias e outros quatro setores para a ocupação de serviços e indústrias. As instalações do Porto contemplam, além das estruturas prediais, áreas de manobra logística, correias transportadoras de carvão mineral e quatro píeres. É importante destacar que a capacidade de movimentação de cargas deste terminal vem crescendo no decorrer dos anos. Em 2016 alcançou uma capacidade de movimentação de 300 mil containers (CEARÁ, 2013).

O Plano diretor, instrumento administrativo que visa ordenar o desenvolvimento do complexo industrial, o qual também orienta o uso e ocupação da área retroportuária do CIPP, definiu o setor I como destinado a Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), a termelétricas e empreendimentos ligados ao Porto. Já o setor II, destina-se a instalação de uma refinaria

de petróleo e, a um polo petroquímico de distribuição de derivados. E os setores III e IV se destinam a instalação de empreendimentos de indústrias em geral, metalomecânico, petroquímico, zonas de processamento, termelétricas e um terminal intermodal de cargas que atende estes dois últimos setores (CEARÁ, 2013).

Em um primeiro momento tais ações parecem surtir efeito na geração de empregos, aumento na oferta de infraestrutura e serviços a estas regiões (SILVA E QUEIROZ, 2009). Por outro lado, uma série de modificações adversas também ocorreram nas áreas de influência do CIPP. Como exemplo, o aumento da população migrante por conta da oferta de empregos, aumento da demanda por serviços públicos de saneamento, saúde, educação e segurança. Ocorreram ainda a alteração da qualidade do ar, solo, da água, a introdução de morbidades e acidentes ambientais como vazamentos, emanções, emissões fugitivas, entre outros (CEARÁ, 2013).

Em 2011, uma ruptura no sistema de transporte de carvão mineral entre o Porto do CIPP e o pátio de estocagem do material, também dentro do complexo, ocasionou a emissão fugitiva de partículas na região. O vazamento deixou casas, no entorno do equipamento, cheias de partículas de carvão mineral. Além disso, alguns moradores da área reclamaram de sintomas respiratórios (CASTRO, 2011). Em 2013, a mesma esteira também foi alvo de denúncias e a Energia Pecém foi multada pelo IBAMA em 15 milhões de reais devido à poluição sonora emitida pelo equipamento. Nesta ocasião, o Ministério Público também afirmou ter recebido novamente denúncias da população com relação à poluição atmosférica causada pelo equipamento (DIÁRIO DO NORDESTE, 2013).

Mais recentemente, em 2017, é a Ceará Portos quem recebe uma multa do IBAMA no valor de 13 milhões de reais devido a um acidente ambiental que resultou no lançamento de carvão mineral na praia do Pecém. Um dos agravantes para esta situação é o fato de que a administração do Porto não relatou o acidente ao IBAMA e não apresentou um relatório ambiental requerido em uma ocorrência anterior a esta (IBAMA, 2017).

Existem outros aspectos ambientais referentes à operação destes empreendimentos que contribuem para a deterioração da qualidade do ar local, a emissão de material particulado proveniente do fluxo de veículos e embarcações, a operação das usinas termelétricas movidas a carvão mineral, além do transporte e estocagem de minério de ferro e carvão vegetal em pátios de estocagem a céu aberto. A região ainda espera receber uma refinaria de petróleo, que além dos riscos e impactos ambientais já conhecidos das atividades

petrolíferas, também emite em seus processos o material particulado (RIGOTTO, 2009; MARIANO, 2001).

Este contexto sugere a importância em monitorar e analisar a qualidade do ar na região, em especial o material particulado fino. Além disso, as áreas portuárias e retro portuárias, principalmente os setores I e II do complexo são consideravelmente populosas com bairros, escolas e pequenos comércios em volta propiciando uma exposição constante da população aos poluentes e possíveis acidentes de grande escala já mencionados.

2.2 POLUIÇÃO, QUALIDADE DO AR E IMPACTOS AMBIENTAIS

O crescimento populacional, a expansão urbana e o atual padrão de consumo, alicerçado no incremento da produção industrial, contribuem de maneira significativa para o aumento da emissão de poluentes atmosféricos (FENGER, 2009). A crescente presença de substâncias contaminantes do meio aéreo e sua deposição no solo, vegetação, corpos hídricos e materiais, trazem inúmeros danos à saúde, a produção vegetal, agrícola e, de uma forma geral, aos ecossistemas expostos.

A poluição atmosférica é entendida como um processo antrópico ou natural de emissão de gases, líquidos ou sólidos na atmosfera, em níveis suficientes para causar danos a materiais, à saúde humana, a fauna e flora, em geral (RAVEN et al, 2010^b).

Segundo a Lei N° 6.938, de 31 de agosto de 1981 que dispõe sobre a Política Nacional de Meio Ambiente, seus fins, mecanismos de formulação, aplicação e outras providências, em seu artigo três, inciso III estabelece que:

Entende-se por poluição, a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente:

- a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas;
- c) afetem desfavoravelmente a biota;
- d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente;
- e) lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos (BRASIL, 1981).

Ganem (2015) destaca que *“a poluição é sem dúvida uma das externalidades negativas mais marcantes do modo de produção e consumo da sociedade moderna, que tem a indústria como uma de suas características dominantes”*.

Os poluentes atmosféricos podem ser classificados de acordo com seu estado físico em gases/vapores ou partículas e podem também ser classificados como poluentes primários, se emitidos diretamente na atmosfera como é o caso do material particulado, óxidos de nitrogênio, dióxidos de enxofre, monóxido de carbono e hidrocarbonetos. Além disso, os poluentes também podem ser classificados como secundários, quando forem o resultado de reações químicas que ocorrem entre os poluentes primários e elementos contidos naturalmente na atmosfera, como é o caso do ozônio formado na baixa atmosfera e o trióxido

de enxofre.

Outro aspecto importante a se destacar sobre os poluentes atmosféricos são as suas fontes. Como já foi destacado a poluição atmosférica é resultado de processos naturais ou antrópicos que liberam matéria ou energia suficientes para causar algum dano à vida ou ao ambiente, desta maneira, é de esperar que existam fontes naturais como emissões vulcânicas, formação de gases em pântanos, ressuspensão de poeiras do solo por ação dos ventos, incêndios naturais, suspensão de pólenes, aerossóis marinhos, entre outros eventos naturais capazes de alterar a qualidade atmosférica (MMA, 2009). Por outro lado, as fontes antrópicas incluem emissões de processos industriais, queima de combustíveis, manejo de produções agrícolas que envolvem a queima da matéria orgânica, a queima de resíduos sólidos em geral, além do uso de produtos voláteis, sprays, entre outros (MMA, 2009).

A revolução industrial é muito apontada como um marco na intensificação dos problemas ambientais provenientes da ação humana. O período é marcado pela intensificação das emissões de poluentes, do surgimento de inúmeras substâncias químicas sintéticas e de formas produtivas que consomem cada vez mais energia e matéria prima (BARBIERI, 2011).

No Brasil, no período de 1955 a início de 1980, ocorreu uma mudança nos modelos de desenvolvimento, antes focado na produção primária de exportação, agora focado em um modelo de substituição de importações. Este novo modo de operação incorpora padrões tecnológicos mais avançados ao setor produtivo nacional. Por outro lado, estes novos padrões não apresentavam o mesmo empenho tecnológico com relação às questões ambientais, ou seja, a tecnologia produtiva evoluiu, mas as medidas de controle de poluição continuam as mesmas (GANEM, 2015).

No início dos anos 70, em meio ao “milagre econômico”, o governo brasileiro observou com receio a crescente preocupação ambiental vinda de países desenvolvidos que também criticavam as questões de democracia e direitos humanos no país. Para o Brasil, e demais países em desenvolvimento, a preocupação ambiental era entendida como uma forma de desestimular seu crescimento. O governo defendia o direito soberano sobre seus recursos, em uma lógica, na qual o país deveria primeiramente se desenvolver e posteriormente pagar pelos custos ambientais (LAGO, 2007).

Apesar do posicionamento do governo brasileiro, diversos movimentos ambientalistas ganharam força dentro e fora do país. Por exemplo, no Brasil, ocorreram diversas críticas à inundação das Sete Quedas no rio Paraná (1979-1982). Também

ocorreram diferentes campanhas pelo país, como as que criticavam o desmatamento ilegal na Amazônia (1978-1979), campanhas pela aprovação de leis de controle a agrotóxicos e desestímulo a seu uso intensivo em algumas regiões do país (1982-1985), bem como, campanhas para obrigar as autoridades Federal e Estadual de São Paulo a tomar medidas urgentes para frear os severos impactos ambientais em Cubatão (1982-1984). (VIOLA E LEIS 1994 apud DIEHL, 1991 p42). Além disso, foi um momento em que as atividades industriais foram percebidas como contribuintes diretas de uma série de problemas ambientais e de saúde pública que ocorriam em regiões próximas a estes empreendimentos (GANEM, 2015).

Um caso emblemático foi o do distrito industrial de Cubatão em São Paulo, onde 116 unidades industriais instaladas na região chegavam a emitir aproximadamente quatrocentas mil toneladas de poluentes por ano, causando graves problemas a saúde da população do entorno (ALMEIDA, 1997). Segundo o responsável do programa de controle de poluição da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb), unidade Cubatão, tais níveis de poluição foram fruto da ausência total de qualquer controle de emissões industriais na região. Tanto que após o início do programa de controle de poluição, a redução dos níveis de poluição foi muito significativa na região de Cubatão. Vale lembrar que ainda hoje a região conta com uma qualidade do ar abaixo do recomendado. Em 2016, a concentração anual média de MP_{10} foi superior a $80\mu g m^{-3}$ e, em 2017, a média anual de concentração foi superior a $70\mu g m^{-3}$. A legislação Paulista estabelece uma média anual de $40\mu g m^{-3}$ como meta intermediária III, e uma concentração média anual de 20 microgramas como padrão final, que sabidamente causa os menores danos à saúde (COSTA, 2017; CETESB, 2018).

Atualmente no Brasil, o controle da poluição do ar é feito com base no controle de poluição e da qualidade ambiental e no controle de emissões por fontes fixas e móveis. As legislações de qualidade ambiental e de controle de poluição incluem o estabelecimento de sanções e infrações, bem como definem instrumentos de gestão (PEREIRA, 2007). Este tipo de legislação atua de forma mais abrangente, como por exemplo do Decreto Lei nº 1.413 de 1975 (complementado pela Lei nº 6.803 de 1980) que dispõe sobre o controle da poluição ambiental proveniente das atividades industriais (MMA, 2009). Tanto o Decreto, quanto a Lei foram concebidos em resposta aos graves eventos de poluição do ar ocorridos em regiões intensamente industrializadas, como foi o caso da cidade de Cubatão, já citado anteriormente (PEREIRA, 2007, MMA, 2009).

Ainda neste mesmo conceito de legislação, em 1981 a Política Nacional de Meio

Ambiente - PNMA (Lei 6938/1981) foi estabelecida. A PNMA define o conceito de poluição e de poluidor. Além disso, atribui ao Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, a competência de elaborar critérios, padrões e normas relativas ao controle e manutenção da qualidade ambiental (BRASIL, 1981).

A Lei nº 6.803 não estabelece diretamente níveis de emissão de poluentes e sim, trata da localização de indústrias em áreas críticas de poluição. São as resoluções do CONAMA que estabelecem parâmetros para a emissão de poluentes gasosos e material particulado de fontes fixas (BRASIL, 1980). A resolução CONAMA nº 5/1989, estabelece o programa nacional de controle da poluição do ar – PRONAR, que segue parâmetros internacionais para estabelecer padrões próprios de qualidade do ar. Estabelece ainda metas e instrumentos de ação para que os programas de qualidade do ar implementados sejam exitosos. As resoluções do CONAMA nº 3/1990 e 382/2006 complementaram o PRONAR estabelecendo limites para a concentração de alguns poluentes como, partículas totais em suspensão (PTS) e inaláveis (MP₁₀), dióxido de enxofre, monóxido de carbono, ozônio e dióxido de nitrogênio. Os limites estabelecidos nestas normas, embora não fossem exatamente os mesmos, levavam em consideração as recomendações da Organização Mundial da Saúde (OMS), a qual se baseou em diversos estudos de impacto a saúde destes poluentes (OMS, 2005).

Recentemente, os padrões nacionais de qualidade do ar foram atualizados tomando como referência os padrões recomendados pela OMS. A resolução CONAMA nº491 de 2018, revoga a CONAMA nº03 de 1990 e os itens 2.2.1 e 2.3 da resolução CONAMA nº5 de 1989. A resolução incorpora padrões mais restritivos e novos poluentes a serem monitorados (MP_{2,5}, Chumbo). Também foram definidos nesta resolução Padrões Intermediários de qualidade do ar (PI I, II e III), a serem e cumpridos sequencialmente, e um padrão final de qualidade do ar (PF), este sim totalmente alinhado ao sugerido pela OMS em 2005. (Tabela 1).

O padrão de qualidade do ar intermediário I (concentração média anual de 20µgm⁻³ e concentração média em 24h de 60µgm⁻³ de MP_{2,5}) entrou em vigor a partir da publicação da resolução em 21/11/2018. Os demais padrões PI II, III e PF deverão ser implementados subsequentemente. A progressão ao padrão subsequente está condicionada ao entendimento dos órgãos ambientais de cada estado e do distrito federal. Desta maneira, caso não seja possível a adoção do parâmetro de qualidade seguinte o padrão atual deve ser mantido. Este é um ponto crítico desta nova resolução pois, diversas questões externas podem influenciar

a “capacidade” dos diferentes estados em avançar, ou não, para padrões mais restritivos de qualidade do ar, principalmente porque não estão definidos prazos para esta transição (OMS, 2005).

Tabela 1: Padrões de qualidade do ar.

	MP_{2,5}		MP₁₀	
	24h*	Anual*	24h*	Anual*
OMS	25µgm ⁻³	10µgm ⁻³	50µgm ⁻³	20µgm ⁻³
Decreto Estadual nº59113/13 - SP	25µgm ⁻³	10µgm ⁻³	50µgm ⁻³	20µgm ⁻³
CONAMA 491/18**	25µgm ⁻³	10µgm ⁻³	50µgm ⁻³	20µgm ⁻³
CONAMA 03/90**	-	-	150µgm ⁻³	50µgm ⁻³

Fonte: Brasil, 1990; OMS,2005; São Paulo, 2013; Brasil, 2018.

Nota:

*média aritmética anual da concentração = anual / média da leitura horária em 24h = 24h

** Os valores da resolução CONAMA 491 expressos na tabela correspondem aos padrões de qualidade final, aqueles que representam o menor dano a saúde possível.

2.3. ATMOSFERA E COMPORTAMENTO DOS POLUENTES

Atmosfera é a camada de gases que envolvem o planeta Terra, dentre estes, o nitrogênio e oxigênio são os gases mais predominantes, representando mais de 99% do ar seco. Também estão presentes na atmosfera, dióxido de carbono, hélio, argônio, vapores de água, e traços de diversos poluentes atmosféricos como metano, óxidos de nitrogênio e de enxofre, partículas e microrganismos em suspensão, entre outros (RAVEN, 2010^a).

A atmosfera é dividida em cinco camadas, troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera, e se torna menos densa a medida que se distancia da superfície do planeta. Desta maneira, a maior concentração de gases atmosféricos está nas camadas inferiores, como a troposfera e a estratosfera.

A troposfera é a camada mais próxima à Terra, estendendo-se até aproximadamente 12km acima da superfície do planeta. A temperatura desta camada diminui em aproximadamente 6°C a cada 1km, a medida em que a altitude aumenta. É na troposfera que ocorrem os fenômenos meteorológicos, ventos turbulentos, tempestades e formação de nuvens. Toda essa intensa movimentação de energia térmica e variação de temperaturas a tornam uma camada bastante instável (RAVEN, 2010^a).

A estratosfera é a camada atmosférica seguinte a troposfera e desta forma, inicia-se a uma distância de 12 km da superfície da Terra estendendo-se a aproximadamente 50km. A região também apresenta ventos, porém sem turbulência. Um ponto de destaque da estratosfera é a sua fina camada de ozônio (O₃). O ozônio estratosférico é produzido pela interação das moléculas de oxigênio presentes nesta camada com os raios ultravioleta (UV) emitidos pelo sol. Cerca de 95% dos raios UV são retidos pelo efeito filtrante da camada de ozônio. Este fenômeno protege diversas formas de vida de queimaduras de sol, alguns tipos de câncer nos olhos, pele, entre outras enfermidades. Previne assim, a formação de ozônio nas camadas atmosféricas mais baixas o que representa um grande risco a saúde (TYLER-MILLER; SPOOLMAN, 2012^c).

A concentração de poluentes atmosféricos em uma determinada região é definida primariamente pelo balanço entre a quantidade emitida e a capacidade da atmosfera local em dispersar estes poluentes vertical e horizontalmente. Desta maneira, a dinâmica atmosférica nas regiões de emissão desempenha um papel importante na definição da qualidade do ar em uma escala temporal e espacial.

Existem diversas maneiras para que os poluentes atinjam a atmosfera, seja pela ação

simples do vento carregando e suspendendo poeiras e particulado, volatilização ou mesmo através de estruturas e equipamentos de exaustão como chaminés de fábricas e pontas de escapamentos de veículos (HERTEL; GOODSITE, 2009).

Após a emissão, através de suas respectivas fontes, os poluentes podem se dispersar pelo ambiente, sofrer processos de transformação, remoção ou acumulação. A dispersão pelo ambiente pode ocorrer pelo movimento de ar que vai transportar os poluentes a favor do vento, através de flutuações de velocidade turbulenta que dispersa as substâncias em diversas direções ou da difusão devido ao gradiente de concentração (JACOBSON, 2002b).

A turbulência é resultado de um movimento irregular dos ventos e pode ser fruto da obstrução física do fluxo contínuo e horizontal do vento por estruturas como prédios ou montanhas. Também pode ser resultado do processo de aquecimento e arrefecimento de massas de ar e da superfície terrestre o que determina a movimentação das massas de ar no sentido vertical. Neste caso, quanto maior a diferença de temperatura, maior é a turbulência vertical (JACOBSON, 2002^b; HERTEL; GOODSITE, 2009).

Outro fator importante na dispersão de poluentes é a estabilidade atmosférica que se caracteriza pela resistência ao movimento vertical da massa de ar ou turbulência existente. Condições de instabilidade atmosférica facilitam os movimentos de convecção e turbulência. O ar mais quente tende a subir e retirar os poluentes das camadas mais próximas à superfície. Por outro lado, condições atmosféricas estáveis estão associadas ao acúmulo de poluentes próximos a superfície por conta da diminuição da capacidade de movimentação vertical da massa de ar. A diferença de temperaturas não é suficiente para promover movimento vertical, com isso os poluentes tendem a se dispersar preferencialmente na horizontal (JACOBSON, 2002^b; HERTEL; GOODSITE, 2009).

As condições meteorológicas também apresentam papel importante no comportamento dos poluentes atmosféricos. Eventos como neve e chuva são capazes de precipitar os poluentes em suspensão contribuindo no processo de remoção da atmosfera. O processo de remoção contribui para a deposição destes poluentes na superfície terrestre, seja no solo, vegetação ou corpos hídricos. Já os vapores de água condensados, que contêm aerossóis, se em contato com poluentes, pode contribuir para a formação de poluentes secundários. Este processo de transformação dos poluentes depende da temperatura atmosférica, umidade relativa, intensidade de radiação solar, da reatividade dos compostos envolvidos e muitas outras variáveis tanto meteorológicas quanto físico-químicas dos poluentes e componentes da atmosfera (KOREN; BISESI, 2003).

2.4 PRINCIPAIS POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Os principais gases poluentes atmosféricos são óxidos de Nitrogênio (NO e NO₂, N₂O), óxido de carbono (CO) e óxido de enxofre (SO₂). Existem ainda outros poluentes de interesse como o metano (CH₄), importante contribuinte do efeito estufa, os compostos orgânicos voláteis (COV) caracterizados por sua capacidade de realizar reações fotoquímicas com outras moléculas e as partículas (MP).

Poluentes gasosos apresentam-se na forma de gases ou vapores e podem ser facilmente absorvidos pelo sistema respiratório humano, porém sua capacidade de penetrar no sistema depende em parte de sua solubilidade, se mais solúveis podem se depositar nas áreas superiores do sistema respiratório e nas áreas inferiores. Já para as partículas, a capacidade de penetração no sistema respiratório está mais relacionada ao seu tamanho aerodinâmico, partículas finas menores que 2,5 micrômetros têm a capacidade de deposição mais profunda em relação às frações mais grossas e podem chegar aos pulmões (OMS, 2005).

2.4.1 Monóxido de carbono

O monóxido de carbono é um dos poluentes mais abundantes e amplamente distribuídos na atmosfera. Sua emissão pode ser natural, como em incêndios florestais, ou antrópica, através da queima do carvão, queima de biomassa, da queima incompleta de substâncias que contenham carbono, do uso combustíveis fósseis, de geradores a gasolina, entre outros (OMS, 2005).

O monóxido de carbono é considerado um asfixiante, pois pode ligar-se de maneira bastante eficiente as hemoglobinas da mesma maneira que as moléculas de oxigênio. Entretanto, a afinidade do CO com a hemoglobina é maior que a do próprio oxigênio, desta forma, mesmo menores quantidades de CO podem competir com as concentrações de oxigênio ambiental prejudicando a oxigenação dos tecidos e causando agravos a saúde, principalmente de indivíduos que tenham problemas cardiovasculares (MAYNARD, 2009).

2.4.2 Óxido de enxofre

O dióxido de enxofre (SO₂) é um gás solúvel em água majoritariamente absorvido

pelas regiões superiores do sistema respiratório contribuindo para o aparecimento de inflamações, bronquite, edemas e piora nos sintomas de asma (Greenberg, N et al, 2016). Uma importante fonte antrópica de SO_2 é a usina termelétrica a carvão. O SO_2 é considerado um dos principais poluentes, dentre os óxidos de enxofre, devido ao seu comportamento quando liberado na atmosfera, ele é capaz de sofrer reações químicas gerando outros poluentes secundários como SO_3 e H_2SO_4 . Tais reações podem ocorrer enquanto associados a material particulado suspensos ou mesmo nos organismos que inalaram tal poluente (OMS, 2005; MAYNARD, 2009).

2.4.3 Óxido de nitrogênio

Existem diversos compostos de nitrogênio presentes na atmosfera, dentre eles pode-se destacar, além do próprio nitrogênio (N), os óxidos de nitrogênio (NO_x) e a amônia (NH_3).

Os óxidos de nitrogênio comumente encontrados na atmosfera são óxido nítrico (NO), um dos grandes contribuintes do aumento do efeito estufa, dióxido de nitrogênio (NO_2). Muito embora o óxido nítrico (NO) tenha fontes naturais, como microrganismos no solo e até tempestades com raios, a maior fonte de NO atmosférico é antropogênica. O NO antropogênico é formado quando o oxigênio atmosférico reage com o nitrogênio presente nos combustíveis durante o processo de combustão. Após a formação do NO ele continua o processo de oxidação e pode se tornar NO_2 , o composto é tóxico e aumenta a sensibilidade a bronquite e asma principalmente nas crianças e idosos, é também um irritante dos pulmões e contribui para a sensibilização a infecções respiratórias (OMS, 2005).

2.4.4 Material particulado (MP)

Diferente de outros poluentes atmosféricos, o MP está em uma classe de poluentes que não apresenta uma estrutura química específica. O MP ou aerossol é definido como uma mistura em suspensão de pequenas partículas sólidas e líquidas presentes na atmosfera. Da mesma forma que os gases, o material particulado pode ser classificado em primários, quando emitidos diretamente de sua fonte, ou secundários quando se formam na atmosfera a partir de reações químicas e físicas com outras substâncias em suspensão (FRUMKIN, 2016).

As fontes de material particulado primário podem ser naturais provenientes de poeira

do solo, pulverização marinha e liberação de biopartículas, como pólenes, esporos, vírus e bactérias. Por outro lado, emissões fugitivas como poeiras de construção civil ou pavimentos, atritos em componentes mecânicos, queima de combustíveis fósseis, queima de biomassa e emissões provenientes de atividades industriais são exemplos de contribuintes para o aumento de material particulado primário de origem antropogênica. De maneira geral, a maior parte das partículas da fração fina é de origem antrópica, já as partículas da fração grosseira tendem a se formar em processos mecânicos e são em sua maioria de origem natural (FRUMKIN, 2016; EPA, 2004).

A composição do material particulado é bastante diversa e variável. Um processo industrial de alta temperatura, por exemplo, gera partículas diferentes das emitidas por um processo de mineração ou de uma termelétrica. A composição depende também da área onde ele é emitido, já que as reações secundárias e adições de massa (coagulação) que podem ocorrer na atmosfera dependem de características meteorológicas da região e dos demais gases e partículas presentes. As partículas em suspensão podem conter substâncias orgânicas como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, podem conter ainda, metais, compostos de enxofre e outras substâncias inorgânicas perigosas (FRUMKIN, 2016).

O MP é categorizado pelo seu tamanho, em uma medida chamada de diâmetro aerodinâmico, que é determinado pela forma e densidade da partícula. Partículas com diâmetro de $10\mu\text{m}$ ou menos são classificadas como MP_{10} . Podem ser formadas por atrito mecânicos ou se originar de detritos atmosféricos como areias e sais marinhos. Este tipo de partícula é pesada o suficiente para sedimentar-se e ser removida da atmosfera rapidamente, desta maneira elas tendem a se concentrar próximo a sua fonte (POPE, 2000; JACONSON, 2002^a). Já as partículas menores, com até $2,5\mu\text{m}$ são classificadas como $\text{MP}_{2,5}$. Este tipo de partícula pode permanecer em suspensão por longos períodos, as menores partículas deste grupo são leves demais para sedimentarem por isso podem ser transportados por longas distancias. Tendem a se formar a partir da coagulação, união entre partículas menores, e condensação de gases de baixa volatilidade (POPE, 2000; JACOBSON, 2002^a; FRUMKIN, 2016).

2.5 IMPACTOS À SAÚDE CAUSADOS PELO MATERIAL PARTICULADO

A escolha por intensificar a atração de empreendimentos industriais para determinadas regiões pode contribuir com aspectos positivos como ofertas de emprego, atração de mais investimento em infraestrutura local, entre outros. Por outro lado, estes empreendimentos podem causar diversos impactos à saúde da população local e ao ambiente. Seus piores impactos são observados nos grandes centros urbanos e nas áreas de aglomeração industrial. (GANEM, 2015).

O sistema respiratório é o mais comum ponto de acesso do MP fino no organismo e consequentemente os pulmões são o principal ponto de ação tóxica das partículas (COCHEO, 2011). Após ser inalado e depositado na superfície pulmonar, as partículas finas são internalizadas nas células pulmonares e desencadeiam uma série de respostas adversas como estresse oxidativo, processos inflamatórios, apoptose, autofagia e diversas disfunções pulmonares e imunes do sistema pulmonar que contribuem para o aumento da susceptibilidade pulmonar a infecções, a diminuição da função pulmonar contribuindo e exacerbando doenças pulmonares obstrutivas e facilitando inflamações recorrentes das vias aéreas (FENG, 2016). Estudos têm observado que mesmo em níveis menores que o estabelecido pela legislação ambiental brasileira certos poluentes atmosféricos causam efeitos a saúde (MORAES, 2010; NASCIMENTO; FRANCISCO, 2013; GAVINIER; NASCIMENTO, 2014).

A amplitude dos efeitos à saúde dos poluentes atmosféricos está relacionada tanto a fatores ambientais quanto individuais. Estão envolvidos neste processo uma série de fatores como o tempo de exposição, características do sistema respiratório do indivíduo, taxas de ventilação, idade e características da própria partícula, como tamanho, solubilidade e seus componentes (EPA, 2004; OMS, 2005; HOU, 2016; GE, 2018).

A idade é um dos fatores individuais mais importantes que pode contribuir para respostas mais acentuadas aos poluentes ambientais. Dentre os grupos mais susceptíveis estão as crianças e os idosos. Muitos estudos encontram associação entre poluição atmosférica e diferentes morbidades em crianças (AMANCIO; NASCIMENTO, 2012; DUNEA, 2016; GE, 2018). Mesmo em repouso um lactente consome o dobro de oxigênio que um adulto também em repouso, além disso, as crianças tendem a passar uma maior parte do dia praticando atividades intensas ao ar livre (TADANO, 2007). Tais atividades tendem a elevar a frequência respiratória e, consequentemente elevam o quanto de poluição é

inalada. Outro fator importante é que o desenvolvimento dos pulmões segue até a adolescência, desta maneira, contatos durante a infância com poluentes pode afetar o desenvolvimento pulmonar adequado destas crianças e deixa-las mais propícias a doenças respiratórias no futuro (EPA, 2016).

Os idosos também estão em maior risco conforme se eleva o nível de poluição do ar por estarem mais susceptíveis a infecções devido ao declínio natural do sistema imunológico e também por conta do histórico de infecções prévias durante a vida, que podem prejudicar a capacidade pulmonar, por exemplo. Inclusive, a prevalência de Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC) e outras doenças respiratórias crônicas tende a aumentar com a idade (OMS, 2005; EPA, 2016; DING, 2017; CHU,2018).

As doenças respiratórias crônicas também representam um número considerável de óbitos atribuíveis à poluição do ar. Em 2012 mais de um milhão e seiscentos mil pessoas morreram devido a DPOC e doenças agudas do aparelho respiratório inferior por conta da poluição do ar indoor e outdoor (OMS,2012).

As Doenças Respiratórias Crônicas (DRCs) representaram juntas 7% da mortalidade global. No Brasil, as DRCs foram a terceira maior causa de morte no país em relação às demais doenças crônicas não transmissíveis (GOULART, 2011). No período de 2003 a 2013, ocorreram mais de seis milhões de internações hospitalares do SUS por DRCs. As maiores taxas de internações foram entre crianças menores de um ano (609,9/100 mil habitantes) e idosos com idade acima de setenta anos (751,9/100 mil habitantes) (MALTA, 2014; SECRETARIA DE VIGILÂNCIA EM SAÚDE, 2016). Somente a DPOC afetava cerca de 200 milhões de pessoas no mundo todo. Em 2017, estima-se que a asma afete cerca de 300 milhões de pessoas (GOULART, 2011; GINA, 2017).

A DPOC é caracterizada pela limitação do fluxo aéreo pulmonar devido associação entre a destruição de parênquima, enfisema e bronquite crônica obstrutiva. A limitação de fluxo é causada pela resposta inflamatória anormal dos pulmões a partículas ou gases nocivos. Respostas inflamatórias recorrentes podem causar danos estruturais nos pulmões ocasionando limitações no fluxo respiratório (BRASIL, 2010; GOLD, 2018).

Mesmo que os mecanismos pelo qual a exposição ao material particulado cause efeitos em pacientes com DPOC não seja totalmente conhecido, pode-se observar que a exposição a MP pode facilitar a ocorrência de complicações da DPOC, mais especificamente as infecções (DING,2017; HUANG, 2019; GAO, 2019). Já que afeta negativamente os processos de depuração mucociliar levando a retenção de secreções e micro-organismos.

Pode também alterar a resistência das células epiteliais do indivíduo prejudicando a função celular de combate a infecções nos pulmões (OMS, 2005).

Os indivíduos com doenças respiratórias crônicas, em particular DPOC, quando expostos a poluição atmosférica são mais afetados se comparados a indivíduos que não apresentam doenças respiratórias crônicas (OMS, 2005; HUANG, 2019). A exposição a poluentes pode contribuir com a exacerbação dos sintomas da DPOC, como dispneia, expectoração e produção de purulência, levando a internação dos indivíduos e podendo evoluir a óbito (LI et al, 2016).

Estudos de morbidade demonstram, por sua vez, que a exposição ao $MP_{2,5}$ estão associados ao aumento dos sintomas de asma, bronquite e visitas a emergências por conta de casos de pneumonia e asma (AMÂNCIO; NASCIMENTO, 2012; ZHENG, 2015; CÉSAR, 2016.). A asma é uma doença inflamatória crônica, caracterizada pela hiperresponsividade das vias aéreas inferiores e pela limitação do fluxo aéreo de maneira variável. É uma condição multifatorial determinada por fatores genéticos e ambientais. Os sintomas recorrentes de asma tendem a piorar a noite e nas primeiras horas do dia, e podem causar insônia, fadiga diurna, redução do número atividades realizadas pelos indivíduos, perda de dias trabalhados e absenteísmo escolar. (GINA, 2017). Amâncio e Nascimento (2012), em seu estudo sobre poluentes ambientais e internação por asma em crianças encontraram que o incremento nas concentrações de material particulado e dióxido de enxofre aumentava o risco para internação por asma entre 8 e 19%. César e colaboradores (2015), observaram que o aumento de $5\mu\text{gm}^{-3}$ do $MP_{2,5}$ contribuem para o incremento de 20 a 30 pontos percentuais o risco de hospitalização de asma e pneumonia em crianças.

A poluição do ar além de causar danos à saúde e ao ecossistema em geral, também causa efeitos em aspectos econômicos e sociais que envolvem os indivíduos. Dependendo da região, dias de trabalho e aula são perdidos, equipamentos e produções agrícolas podem ser afetados e os custos dos sistemas de saúde podem se elevar além, é claro, dos custos arcados pelo paciente com o tratamento da doença (INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2014).

3 JUSTIFICATIVA

A poluição atmosférica é um dos maiores problemas ambientais tanto em nível global quanto local. A exposição dos indivíduos a uma atmosfera contaminada por material particulado pode causar danos à sua saúde ou até mesmo piorar problemas já existentes. Neste sentido, sabendo que as atividades industriais têm grande potencial de emissão de poluentes atmosféricos, pode-se perceber que a área de influência do Complexo Industrial e Portuário do Pecém merece especial atenção, uma vez que as inúmeras atividades industriais que lá são realizadas por muitos anos podem contribuir com deterioração da qualidade do ar local e o agravamento à saúde da população local.

Desta forma, torna-se importante utilizar ferramentas capazes de monitorar a concentração de material particulado fino (MP_{2,5}) nas regiões sob a influência do complexo, principalmente devido à ausência de monitores da qualidade do ar na região. Além disso, o vasto conhecimento sobre os efeitos adversos do MP_{2,5} à saúde tornam evidente que além da estimativa das concentrações de material particulado também seja analisada a associação entre MP_{2,5} e os óbitos por doenças do aparelho respiratório.

Com isso, o objetivo desta pesquisa foi estimar a concentração de material particulado fino nos Municípios de São Gonçalo do Amarante (Ai I), Paracuru, Paraipaba (Ai II) e Caucaia (Ai III) e estudar associação entre estes e os óbitos por doenças do aparelho respiratório. Os resultados obtidos aqui podem contribuir para direcionar medidas de gestão das empresas envolvidas, bem como prover informações importantes para órgãos públicos referente a saúde da população e a qualidade do ar nos municípios estudados.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

- Analisar a relação entre a concentração estimada de material particulado e os óbitos por doenças do aparelho respiratório nas áreas de influência do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, no período de 2006 a 2017.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar a concentração de material particulado nas áreas de influência do Complexo Industrial e Portuário do Pecém por meio de dados de profundidade óptica monitorados por satélite;
- Quantificar a ocorrência dos óbitos por doenças do aparelho respiratório na população residente nas áreas de influência do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, no período de 2006 a 2017.
- Analisar a associação entre a concentração estimada de material particulado nas áreas de influência do Complexo Industrial e Portuário do Pecém e os óbitos por doenças do aparelho respiratório.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 DELINEAMENTO DO ESTUDO

Foi realizado um estudo ecológico de série temporal com o objetivo de analisar a associação entre os níveis ambientais de material particulado da fração de $2,5\mu\text{m}$ e o número de óbitos por doenças respiratórias nos municípios de Caucaia, Paracuru, Paraipaba e São Gonçalo do Amarante no período de 01 de janeiro de 2006 a 31 de dezembro de 2017.

A opção por tal desenho de estudo se deve ao fato de que os estudos ecológicos trabalham com dados agregados coletados rotineiramente e de domínio público disponibilizados em forma de bancos de dados. Além disso, estudos ecológicos permitem a geração de hipóteses e a avaliação dos impactos de uma determinada variável em um nível agregado.

A população de estudo inclui todos os indivíduos residentes dos Municípios de Paracuru, Paraipaba, São Gonçalo do Amarante e Caucaia que faleceram no período de estudo por doenças do aparelho respiratório.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

O estudo foi realizado em escala municipal e abrangeu os municípios de Caucaia, São Gonçalo do Amarante, Paracuru e Paraipaba, que foram definidos como as áreas de influência do CIPP e de interesse para este estudo. A definição da área de influência se baseou na direção preferencial dos ventos na região e em uma área de dispersão de 30km definida a partir do setor I do CIPP, área que atualmente abriga uma gama mais diversa de indústrias (Figura 1).

A partir disso, os municípios foram divididos em três diferentes áreas de influência. O município de São Gonçalo do Amarante foi definido como área de influência I já que abriga o setor I do CIPP. Possui instalado em seu território uma diversidade maior de indústrias, como por exemplo, a Companhia Siderúrgica do Pecém e a termelétrica Energia Pecém. Os dois empreendimentos abrigam grandes depósitos de carvão mineral a céu aberto utilizado para a geração de energia.

Os Municípios de Paracuru e Paraipaba foram definidos como a área de influência II (A_i II) por se localizarem na direção preferencial dos ventos na região (ventos do leste para oeste principalmente nos meses de setembro a fevereiro). Já o município de Caucaia encontra-

se no sentido oposto à direção preferencial dos ventos e foi definido como a área de influência III (Ai III) (figura 1).

Figura 1: Demarcação da área do CIPP e destaque dos Municípios sob sua influência. Estado do Ceará, Brasil.



Fonte: O autor

5.2.1 Área de influência I – Município de São Gonçalo do Amarante

Localizado a 55km de Fortaleza, o município de São Gonçalo do Amarante tem uma área de 834,4km² e é construído, além de sua sede, por sete distritos: Cágado, Siupé, Umarituba, Pecém, Croatá, Taíba e Serrote. Tem como municípios limítrofes de interesse Caucaia, a leste, e Paracuru e Paraipaba ao norte, sendo que Paracuru também abrange uma porção leste da região mais litorânea de São Gonçalo do Amarante.

O clima da região é tropical quente semiárido brando, a unidade fitoecológica predominante é o complexo vegetacional da zona litorânea, a temperatura média varia entre 26°C a 28 °C, com pluviosidade média de 1.026,4mm e período chuvoso entre os meses de janeiro e maio.

No último censo (2010) o município contava com 43.890 habitantes, entre 2000 e 2010 a população municipal cresceu em média 2,1% ao ano, crescimento populacional maior que o do Brasil (1,1% a.a) no mesmo período. Com relação a estrutura etária do município, 27% da população tem menos de 15 anos e 66% da população tem entre 15 e 65 anos. A população estimada em 2018 é de 48.516 habitantes.

Em 2010, a taxa de escolarização de 6 a 14 anos era de 98%. A proporção de jovens com idade de 15 a 17 anos com o ensino fundamental completo foi de 65% e a proporção de indivíduos com 18 a 20 anos com ensino médio completo foi de 45%.

Em 2010, o município contava com 81 indústrias ativas e foram gerados 6.273 novos postos de trabalho e 3.213 desligamentos fechando o ano com um saldo positivo de 3.060 vagas de emprego e uma variação de 104.05% em relação ao ano anterior. Os setores de construção civil e da indústria de transformação foram os principais geradores de emprego. Em 2016, o município contava com 188 indústrias ativas e gerou 5.566 postos de trabalho e 8.877 desligamentos. No final do ano, o saldo de geração de emprego foi negativo com -3.311 postos de trabalho. O setor da indústria de transformação esteve entre os principais geradores de empregos, com 1.645 vagas geradas e o setor de construção civil foi o segundo maior gerador de empregos criando 1.640 vagas. O salário médio mensal dos trabalhadores formais em 2016 foi de 3,7 salários mínimos e a proporção de pessoas ocupadas em relação à população total foi de 24%.

O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) passou de 0,46 nos anos 2000 para 0,66 em 2010, crescendo 44,88% no período, a dimensão educação foi a que mais cresceu no período de 2000 a 2010 com um aumento de 0.35 no índice.

5.2.2 Área de influência II – Municípios de Paracuru e Paraipaba

Localizados a mais de 70 km da capital Fortaleza, os municípios de Paracuru e Paraipaba ocupam uma área de 303,3km² e 300,9km², respectivamente. Paracuru possui três distritos: Jardim e Poço Doce, além da sede Paracuru. Já Paraipaba tem quatro distritos: Lagoinha, Camboas, Boa Vista e a sede municipal Paraipaba.

O clima de ambos os municípios é semelhante ao de São Gonçalo do Amarante, tropical quente semiárido brando e a unidade fitoecológica predominante é o complexo vegetacional da zona litorânea. Porém em Paracuru também é possível observar a presença de floresta mista dicotillo-palmacea (mata ciliar com carnaúba e dicotiledôneas). A temperatura média varia entre 26 a 28°C em ambos os municípios, a pluviosidade média é de 1.238,2mm também para as duas regiões, e o período chuvoso em Paracuru vai dos meses de janeiro a abril, enquanto que em Paraipaba se estende até maio.

No último censo (2010) o município Paracuru contava com 31.636 habitantes, entre 2000 e 2010 a população municipal cresceu em média 1,4% ao ano, crescimento populacional maior que o do Brasil (1,1 % a.a) no mesmo período. Com relação a estrutura etária do município, 27% da população tem menos de 15 anos e 65% da população tem entre 15 e 65 anos. A população estimada em 2018 é de 34.097 habitantes.

No último censo (2010) o município Paraipaba contava com 30.041 habitantes, entre 2000 e 2010 a população municipal cresceu em média 1,7% ao ano, crescimento populacional maior que o do Brasil (1,1 % a.a) no mesmo período. Com relação a estrutura etária do município, 28% da população tem menos de 15 anos e 64% da população tem entre 15 e 65 anos. A população estimada em 2018 é de 32.700 habitantes.

Em 2010, a taxa de escolarização de 6 a 14 anos em Paracuru foi de 97,2% e em Paraipaba de 97,8%. A proporção de jovens com idade de 15 a 17 anos com o ensino fundamental completo em Paracuru foi de 49% e 59% em Paraipaba. A proporção de indivíduos com 18 a 20 anos com ensino médio completo em Paracuru foi de 37% e em Paraipaba foi de 43%.

Em 2016, 710 postos de emprego foram gerados em Paracuru e 861 em Paraipaba, foram registrados 774 desligamentos em Paracuru e em Paraipaba, 977 desligamentos. No final do ano, o saldo de geração de emprego foi negativo em ambos os municípios com -64 postos de trabalho em Paracuru e -116 em Paraipaba.

Os setores de indústria de transformação e comércio foram os maiores geradores de

emprego em Paracuru, por outro lado, em Paraipaba o setor de agropecuária e construção civil foram os maiores geradores de emprego no município com 276 e 240 vagas de trabalho criados respectivamente.

O salário médio mensal dos trabalhadores formais em 2016 foi de 2,3 salários mínimos em Paracuru e em Paraipaba o salário médio mensal foi de 1,5 salários mínimos. Em ambos os municípios, a proporção de pessoas ocupadas em relação à população total foi de 11%.

O IDHM de Paracuru passou de 0,46 nos anos em 2000 para 0,64 em 2010, crescendo 39,39% no período. Já o IDHM de Paraipaba passou de 0,49 nos anos 2000 para 0,63 em 2010, crescendo 28,08% no período. Em ambos os municípios, a dimensão educação foi a que mais cresceu no período com um aumento de 0.29 no índice em Paracuru e de 0.26 em Paraipaba.

5.2.3 Área de influência III – Município de Caucaia

O município de Caucaia está localizado a aproximadamente 20km de Fortaleza e ocupa uma área de 1.228,5km², sendo o maior município dentre os quatro estudados. Tem oito distritos: Bom Princípio, Catuana, Guararu, Jurema, Mirambé, Sítios Novos, Tucunduba e a sede Caucaia. Tem como municípios limítrofes de interesse Fortaleza, a leste, e São Gonçalo do Amarante abrangendo as porções norte e oeste de Caucaia.

A região pode apresentar três tipos de clima diferentes, sendo predominante o tropical quente semiárido brando, o mesmo encontrado nos demais municípios estudados. O clima tropical quente sub úmido é observado na porção sul/sudeste do município e é semelhante ao observado em Fortaleza. Já o clima tropical quente úmido é observado bem ao sul do município sendo mais predominante no município de Maranguape.

A unidade fitoecológica predominante é o complexo vegetacional da zona litorânea. Porém, é possível observar a formação de cerrado e caatinga arbustiva densa, esta última predominante mais ao sul do município. A temperatura média varia entre 26°C a 28°C, com pluviosidade média de 1.243,2 mm e período chuvoso entre os meses de janeiro e maio.

No último censo (2010) o município contava com 325.441 habitantes, entre 2000 e 2010 a população municipal cresceu em média 2,5% ao ano, crescimento populacional maior que o do Brasil (1,1 % a.a) no mesmo período. Com relação a estrutura etária do município, 27% da população tem menos de 15 anos e 67% da população tem entre 15 e 65 anos. A população estimada em 2018 foi de 363.982 habitantes.

Em 2010, a taxa de escolarização de 6 a 14 anos foi de 96.3%. A proporção de jovens

com idade de 15 a 17 anos com o ensino fundamental completo foi de 55% e a proporção de indivíduos com 18 a 20 anos com ensino médio completo foi de 36%.

Em 2010, o município contava com 780 indústrias ativas e foram gerados 10.801 postos de trabalho no município e 8.483 desligamentos fechando o ano com um saldo positivo de 2.318 vagas de emprego e uma variação de 14,31% em relação ao ano anterior. Os setores de comércio e da indústria de transformação foram os principais geradores de emprego.

Em 2016, o município contava com 2.263 indústrias ativas e 12.892 novos postos de trabalho foram gerados e 16.699 desligamentos foram registrados. No final do ano o saldo de geração de emprego foi negativo com -3.807 postos de trabalho. Mais uma vez o setor da indústria de transformação esteve entre os principais geradores de empregos com 4.164 postos de trabalho e o setor de serviços foi o segundo maior gerador de empregos gerando 3.292 vagas. O salário médio mensal dos trabalhadores formais em 2016 foi de 2,1 salários mínimos e a proporção de pessoas ocupadas em relação à população total foi de 10%.

O IDHM do município passou de 0,55 nos anos 2000 para 0,68 em 2010, crescendo 22,88% no período, a dimensão educação foi a que mais cresceu no período de 2000 a 2010 com um aumento de 0.23 no índice.

5.3 ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO (MP_{2,5}) - Exposição

Devido a impossibilidade de acesso a dados de leituras diárias da qualidade do ar relativos as concentrações de material particulado da fração de 2,5 µm para as regiões em estudo, foi necessário o uso de metodologias que utilizassem o sensoriamento remoto para a estimativa da concentração de tal poluente em cada uma das áreas de estudo.

Para realizar tal procedimento foram utilizadas as estimativas médias diárias da espessura óptica de aerossóis (AOD) de comprimento de onda de 550 nm – (Dark Target). A utilização de medidas de AOD, que expressam a quantidade média de partículas da coluna atmosférica integrada, pode ser usada na estimativa do MP_{2,5} e tem se demonstrado bastante eficiente (KUMAR, 2007; KUMAR, 2008; DONKELAAR et al, 2010; ANDRADE FILHO,2011).

As leituras de AOD podem ser produzidas por estações terrestres como é o caso da rede de fotômetros solares “Aerosol RObotic NETwork” (AERONET) ou podem ser obtidas através de sistemas de sensoriamento remoto por meio de sensores MODIS (Moderate Resolution

Imaging Spectroradiometer). O MODIS é um radiômetro espectral passivo de recobrimento global a cada dois dias com uma área de varredura de 2.330km, de resolução espacial variável entre 250m (VIS) e 1km (TIR), utilizado para observação terrestre (vegetação, incêndios entre outros), oceânica (gelo marinho, fluorescência de clorofila) e atmosférica (propriedades de nuvens e poluentes atmosféricos).

O sensor MODIS está a bordo dos satélites AQUA e TERRA que fazem parte do programa de observação da Terra (Earth Observation – EO). Esse programa aporta diversas missões que objetivam a obtenção de informações sobre sistemas físicos, químicos e biológicos do planeta (LIRA et al, 2016).

5.3.1 Coleta de dados de AOD

A coleta de dados de AOD foi realizada através do aplicativo online Geospatial Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure (GIOVANNI) que prove acesso a uma gama variada de dados de sensoriamento remoto de diferentes programas e missões espaciais da NASA. As informações adquiridas de AOD fornecidas no GIOVANNI são provenientes do sensor MODIS a bordo dos satélites AQUA e TERRA. Ambos os satélites apresentam estes dados com resolução temporal diária e resolução espacial de 3km. Os dados coletados de AOD abrangeram o período de 01/01/2006 a 31/12/2017.

A utilização dos dados disponibilizados pelo GIOVANNI torna bastante simples este procedimento de obtenção das medidas de AOD. Esta plataforma é composta por um grupo de pesquisadores de Harvard que trabalha oferecendo dados de diferentes sensores já processados para consulta e pesquisa em um formato simples para se trabalhar.

Como mencionado anteriormente, para a coleta dos dados é necessário selecionar as áreas dos municípios do estudo através de coordenadas traçadas a partir de coordenadas geográficas. Desta forma, a área que compreende o município de Caucaia foi demarcada como norte latitude -3.565851, sul latitude -3.992041, leste longitude -38.645648 e oeste longitude -38.997520. O município de São Gonçalo do Amarante foi definido como norte latitude -3.557242, sul latitude -3.696246, leste longitude -38.858943 e oeste longitude -39.314822. A área dos municípios de Paracuru e Paraipaba foram delimitadas em um mesmo polígono, norte latitude -3.335093, sul latitude -3.530176, leste longitude -38.917054 oeste longitude -39.255959.

5.3.2 Coleta de dados meteorológicos

Além das informações diárias de AOD, para a estimativa da concentração de material particulado fino foi necessário obter informações meteorológicas sobre a temperatura média e umidade relativa média para ajuste dos modelos preditivos. Optou-se por utilizar dados coletados in loco, a solicitação das informações meteorológicas foi feita à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), nº protocolo – 0828307, porém, dentre as três áreas de influência somente a Ai I e III dispunham de estações meteorológicas que, no entanto, não disponibilizaram informações meteorológicas para todo o período da pesquisa.

Com isso foi necessário a coleta destas informações em uma estação meteorológica em região próxima. E, neste caso, os dados foram coletados da estação meteorológica de Fortaleza – CE (cód OMM: 82397). Trata-se de uma estação meteorológica convencional composta por diferentes instrumentos meteorológicos isolados que registram continuamente diversos dados como temperatura, umidade relativa, pressão atmosférica, entre outros. Está localizada na cidade de Fortaleza, estado do Ceará, latitude -3.81° e longitude -38.53° .

Para a coleta de dados da estação de Fortaleza, utilizou-se o banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa disponibilizado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), de onde foram coletadas as leituras diárias de temperatura (máxima, mínima e média compensada) e umidade relativa média para o período de 2006 a 2017.

Além dos dados de temperatura e umidade relativa, esta pesquisa se utilizou de informações sobre velocidade e direção preferencial dos ventos coletadas in loco. Apesar de não constarem em nosso modelo de predição do $MP_{2,5}$ são uteis para entender a dinâmica dos poluentes na região. Estas informações foram obtidas através do site do Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA). Havia somente dados relativos ao Municípios de Caucaia (PCD – 32322) e São Gonçalo do Amarante (PCD – 32325) e somente no período de 2006 a 2015.

5.3.3 modelo utilizado para predição do $MP_{2,5}$

Este trabalho fez uso do modelo de predição de material particulado fino desenvolvido por Gonçalves (2016), e que utiliza como preditores lineares as leituras diárias de AOD, leituras diárias de temperatura média (TEMP) e de umidade relativa (RH), segundo a aplicação da equação a seguir:

$$\begin{aligned} MP_{2,5} = & \exp(\alpha + \beta_1 \cdot AOD + \beta_2 \cdot AOD^2 + \beta_3 \cdot AOD^3 + \beta_4 \cdot (AOD \cdot TEMP) + \\ & \beta_5(AOD \cdot RH) + \beta_6(AOD \cdot TEMP^2) + \beta_7(AOD \cdot RH^2) + \beta_8(AOD \cdot \cos_days) + \\ & \beta_9(AOD \cdot \sin_days) + \beta_{10}(AOD^2 \cdot \cos_days) + \beta_{11}(AOD^2 \cdot \sin_days) + \\ & \beta_{12}(AOD^3 \cdot \cos_days) + \beta_{13}(AOD^3 \cdot \sin_days) \end{aligned}$$

O modelo de regressão não linear é composto por função exponencial dos preditores lineares o que resulta em uma estimativa da média da exposição. Em nosso caso, da concentração média diária do $MP_{2,5}$ em μgm^{-3}

O modelo considerou ainda os dados de AOD como polinômios de primeiro, segundo e terceiro grau (AOD, AOD^2, AOD^3) e, em seguida, considerou as variáveis meteorológicas como controle das estimativas de AOD ($TEMP, TEMP^2, RH, RH^2$).

Por fim, foram acrescentadas no modelo termos de interação entre o AOD, AOD^2 , AOD^3 , e o seno e cosseno da variável dia para um período de 365,25 dias ($\cos.(days*2*\pi/365.25)$, $\sin.(days*2*\pi/365.25)$). Este tipo de medida do seno e cosseno dos dias, ajuda a controlar as sazonalidades não esperadas no modelo, ou seja, que não estão presentes na forma de variáveis de controle.

Em seu estudo, Gonçalves (2016), avaliou a performance de seu modelo validando os dados estimados por satélite com os dados mensurados obtidos em estação de monitoramento da qualidade do ar em solo e observou que seu modelo explicava em média, 82% da variação das concentrações de material particulado fino no período de estudo.

Desta forma, devido a boa performance do modelo, de sua simplicidade estrutural, envolvendo somente três variáveis e da relativa facilidade de aplicação, optou-se por utilizar este modelo em nossas regiões de estudo.

5.4 COLETA DE DADOS DE MORTALIDADE - Desfecho

Todos os registros de informações sobre óbito no Brasil estão disponíveis no Sistema de Informação sobre Mortalidade do Sistema Único de Saúde (SIM-SUS). O SIM é administrado pelo Departamento de Informática do SUS (DATASUS), o qual tem como uma de suas atribuições, a divulgação e manutenção dos acervos de informação em saúde do SUS para todos os sistemas de informação em saúde do país.

As informações contidas no SIM são provenientes das Declarações de Óbito (DO) que são os documentos oficiais para a coleta de informações sobre a mortalidade no país. As DOs que agregam informações de identificação dos falecidos, a causa do óbito segundo a Classificação Internacional de Doenças (CID), o local do óbito entre outras informações totalizando 56 variáveis a serem preenchidas.

As DOs são preenchidas nos municípios de ocorrência do óbito, por um médico em caso de morte natural, caso contrário, deve ser preenchido por um legista após a realização da autópsia.

As declarações de óbito são recolhidas pela Secretaria Municipal de Saúde que digitaliza e consolida as informações no SIM local. A partir daí estes dados municipais de óbito são agregados em nível Estadual, que une todas as informações de óbitos dos demais municípios e a informação segue para uma esfera Federal que agrega as informações dos diferentes Estados do país. Uma vez no nível federal a Secretaria de Vigilância em Saúde, por meio da Coordenação-Geral de Informações e Análises Epidemiológicas (CGIAE) agrega as informações do SIM por Estado, processa as análises e distribui as informações que ficam disponibilizadas no site do DATASUS.

5.4.1 Registros de informação de óbito

As análises foram realizadas utilizando dados secundários provenientes do SIM dos municípios de Paracuru, Paraipaba, São Gonçalo do Amarante e Caucaia. Como a pesquisa envolve mais de um município, os bancos de dados foram requisitados a Secretaria de Saúde do Estado do Ceará que agrega todos estes bancos.

Foram coletados dados referentes aos registros diários de mortalidade por doenças do aparelho respiratório, capítulo X completo da CID 10 no período de 01/01/2006 a 31/12/2017. Os dados foram requisitados seguindo os procedimentos estabelecidos pela secretaria Estadual de Saúde do Estado do Ceará que incluiu, a submissão do projeto de pesquisa na Plataforma Brasil, e a realização da requisição de acesso aos bancos mediante a elaboração do termo de fiel depositário.

Após a autorização do acesso aos bancos de dados a coleta dos bancos ocorreu por meio de um CD/DVD-rom virgem, já que a transferência do banco por e-mail, pen drives ou dispositivos semelhantes não é permitida, preservando desta maneira a segurança da informação contida nos bancos de dados. Informações nominais, como telefones de contato e

documentos de identificação civis (como identidade, CPF, entre outros) dos indivíduos foram excluídas dos bancos.

5.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

5.5.1 Descritiva

Dados meteorológicos e material particulado - Calculou-se para cada área de estudo a predição média, mínima e máxima e o desvio padrão das leituras do AOD para todo o período.

Para os dados de $MP_{2,5}$ foram calculados o desvio padrão e as concentrações média mínima e máxima de cada área de estudo. Também foram calculadas as concentrações médias de $MP_{2,5}$ para cada estação do ano (primavera, verão, outono e inverno) de toda a série 2006 a 2017. Foi calculada também a correlação de Pearson entre o $MP_{2,5}$ estimado e as variáveis meteorológicas. O cálculo da correlação é importante para avaliar o comportamento das variáveis meteorológicas em relação as concentrações estimadas de $MP_{2,5}$ em cada área de estudo.

Dados meteorológicos relativos à direção e velocidade dos ventos foram fornecidos em medidas horárias, de três em três horas, a partir da 00:00h de cada dia. Para trabalhar com os dados diários estimados de $MP_{2,5}$ foram calculadas as médias diárias da direção e velocidade dos ventos. Os cálculos destas médias foram realizados através de uma função específica do pacote “*Openair*” disponível no programa estatístico R. Além disso, também foram calculadas velocidade e direção médias dos ventos por estação do ano.

Dados de mortalidade – As informações provenientes do banco de dados de mortalidade por DAR foram agrupadas de acordo com suas respectivas áreas de influência, a partir dos dados foram calculadas as taxas de óbito por 100.000 habitantes para cada A_i . As taxas de óbito foram padronizadas pela população de Caucaia para permitir a comparação.

5.5.2 Incremento percentual do Risco Relativo

Para trabalhar com os dados diários de mortalidade por doenças do aparelho respiratório (DAR) e da concentração estimada de $MP_{2,5}$ foi utilizado um modelo aditivo generalizado (MAG) com regressão de *Poisson*.

Um modelo de regressão múltipla se demonstra inadequado para nosso estudo devido ao fato de nossas variáveis respostas serem de eventos raros, contagem diária de mortalidade

por DAR. Desta forma, a hipótese de distribuição normal não seria verdadeira. Os modelos aditivos generalizados são adequados para nosso estudo, pois são menos rígidos em relação ao comportamento da variável resposta, suportam em sua modelagem covariáveis defasadas no tempo e são capazes de trabalhar com variáveis explicativas que não tenham uma relação linear com a variável resposta.

Para estimação da associação entre a concentração de material particulado e a mortalidade por doenças do aparelho respiratório, aplicou-se o modelo final descrito, a seguir:

Modelo final:

$$\text{DAR} = s(\text{MP}_{2,5}, \text{bs}=\text{"cr"}, k=4) + s(\text{matmed}, \text{bs}=\text{"cr"}, k=2) + s(\text{time}, \text{bs}=\text{"cr"}, k=11) + \text{as.factor(dow)} + \text{holiday} + \text{ur}$$

Onde, α representa o intercepto, “s” é o *spline* (alisador), o termo “bs” define o tipo de spline utilizado, que no caso é o *cubic regression spline* (cr), e K é o número de nós utilizado no spline. Desta forma, foram utilizados *splines* (alisadores) nas variáveis $\text{MP}_{2,5}$, na média móvel da temperatura média (matemed) e na variável centralizadora da série (time).

A variável “dow” representa os dias da semana, o termo “holiday” representa as informações sobre feriados e a variável “ur” agrupa informações sobre a umidade relativa média diária (UR).

Para controle da sazonalidade de longa e de curta duração foram inseridas no modelo os termos de centralização da série, informações sobre o dia da semana, na forma de variáveis dummy e feriados.

Os resultados desta análise foram reportados na forma da variação percentual do risco relativo de óbito por DAR associado ao aumento de $10 \mu\text{g m}^{-3}$ de $\text{MP}_{2,5}$ e seus respectivos intervalos de confiança (IC 95%) para cada uma das regiões de estudo. Pode-se estimar a variação do risco relativo associado ao aumento de qualquer concentração de poluente, e é comum fazer esta estimativa associada ao aumento de 5, $10 \mu\text{g m}^{-3}$ ou a algum intervalo interquartil específico do estudo. Com isso, optou-se por avaliar de acordo com o incremento de $10 \mu\text{g m}^{-3}$ por ser uma medida comum em diferentes estudos.

A relação de todas as variáveis do estudo foi avaliada pelo coeficiente de correlação de Pearson. A seleção dos melhores modelos foi feita pela avaliação do R^2 ajustado, valores de Akaike (AIC), comportamento dos resíduos e significância da variável spline ($\text{MP}_{2,5}$).

Para as análises estatísticas e produção do modelo de estimativa de $\text{MP}_{2,5}$ foi utilizado

o software R, versão 3.4. Para a delimitação das coordenadas das áreas de influência do CIPP foi utilizado o software Google Earth Pro, versão 7.3.0. E foi utilizada a biblioteca *mgcv* do R para a análise dos modelos MAG e de estimativa do aumento percentual do risco relativo.

5.6 CONSIDERAÇÕES ÉTICAS

Nesta pesquisa todos os critérios éticos foram respeitados de acordo com a resolução nº 466 de 2012, durante a elaboração e execução. O presente estudo foi elaborado com dados secundários agregados de óbitos sem identificação pessoal, portanto foi solicitado a dispensa do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.

O presente projeto foi submetido à apreciação do Comitê de Ética e Pesquisa da instituição da Escola Nacional de Saúde Pública/Fundação Oswaldo Cruz (CAAE - 90834018.4.0000.5240) e considerado apto para ser conduzido (parecer CEP – nº 2.751.291).

6 RESULTADOS

Os resultados foram apresentados em formato de artigo. O primeiro artigo apresenta as estimativas da concentração do $MP_{2,5}$ e seu comportamento nas Ais. O segundo artigo apresenta as informações de órbito e a relação com o $MP_{2,5}$ estimado no primeiro artigo.

Em ambos os artigos, os resultados foram apresentados em dois períodos, de 2006 a 2010 e de 2011 a 2017, para melhor demonstrar os achados de acordo com o processo de expansão do CIPP.

Estimativa da concentração média diária do material particulado fino em três áreas sob a influência do Complexo Industrial e Portuário do Pecém “Não submetido”

Resumo

CONTEXTO: A exposição ao material particulado fino (MP_{2,5}) está associada a inúmeros desfechos à saúde. Com isso, o monitoramento da concentração ambiental do MP_{2,5} é importante especialmente em regiões habitadas e que dividem espaço com áreas amplamente industrializadas. Uma técnica de estimativa do MP_{2,5} por sensoriamento remoto foi aplicada nesta pesquisa para cobrir as áreas de estudo que não eram monitoradas.

OBJETIVO: Estimar a concentração de material particulado nas áreas de influência do Complexo Industrial e Portuário do Pecém por meio de dados de profundidade óptica monitorados por satélite

MÉTODO: Nesta pesquisa foi aplicado um modelo não linear de estimativa do MP_{2,5} por meio de dados de profundidade óptica monitorados por satélite. As estimativas foram realizadas no período de 2006 a 2017 em três áreas de influência (Ai) do complexo industrial e portuário do Pecém abrangendo os municípios de São Gonçalo do Amarante (Ai I), Paracuru e Paraipaba (Ai II) e Caucaia (Ai III).

RESULTADOS: As médias anuais das concentrações estimadas foram inferiores ao estabelecido pela legislação nacional em todas as Ais (8µg m⁻³). Em todas as Ais, os meses da primavera apresentaram as maiores concentrações e os meses do outono foram os que apresentaram as menores concentrações em todo o período de estudo. Os meses de maior concentração de MP_{2,5} apresentavam uma maior incidência de ventos leste na região.

CONCLUSÃO: As condições meteorológicas podem exercer um papel importante nos processos de remoção, dispersão ou manutenção das concentrações do material particulado na região. As áreas sob a influência do CIPP, apresentam médias anuais de concentração de material particulado abaixo do padrão estabelecido pela legislação ambiental nacional, a partir disso, é importante avaliar a constituição das partículas desta região bem como sua possível associação a impactos à saúde da população local.

Palavras-chave: Qualidade do ar, material particulado fino, empreendimentos industriais, profundidade óptica do aerossol.

INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica representa uma grande ameaça à saúde pública. As partículas com diâmetro aerodinâmico menor que $2,5\mu\text{m}$ ($\text{MP}_{2,5}$) merecem grande atenção devido sua capacidade de penetração no sistema respiratório e impacto ao sistema circulatório. São importantes fatores de risco para o aumento de morbimortalidades relacionadas as doenças respiratórias e cardiovasculares (FENG, S; et al, 2016; FRUMKIN, 2016).

Segundo o *Health Effects Institute* em 2016, o $\text{MP}_{2,5}$ foi o sexto maior risco de mortalidade prematura, contribuindo para a morte de aproximadamente 4 milhões de pessoas em todo mundo (Health Effects Institute^a, 2018)³. Esse tipo de poluente se sobrepõe inclusive a fatores de risco já conhecidos como consumo de álcool e elevado consumo de sódio (Health Effects Institute^a, 2018). No Brasil, em 2017, estima-se que a poluição por $\text{MP}_{2,5}$ seja responsável pela morte de 50.300 pessoas (Health Effects Institute^b, 2018).

Assim o monitoramento da qualidade do ar é importante para subsidiar informações necessárias a manutenção dos níveis de poluentes atmosféricos em concentrações seguras. No Brasil, a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente número 05 de 1989 (CONAMA 05/89) estipula a criação de uma Rede Nacional de Monitoramento da Qualidade do Ar e é complementada pela Resolução CONAMA n°03 (CONAMA 03/90) que definiu os padrões de qualidade do ar e determinou que é de responsabilidade dos Estados a instalação destas redes de monitoramento em seus territórios (BRASIL, 1989; BRASIL, 1990).

Apesar do que foi estabelecido pelas resoluções do CONAMA, os sistemas de monitoramento estaduais são escassos e muitas vezes ineficientes. No primeiro relatório nacional sobre a situação do monitoramento da qualidade do ar no país, publicado em 2014, somente 10 estados e o Distrito Federal estavam com suas redes de monitoramento ativas (INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2014).

A falta de cobertura das redes de monitoramento representa um grande desafio na avaliação da exposição humana ao $\text{MP}_{2,5}$ antrópico, inclusive, os de fontes industriais. Esse é o caso dos Municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante no Estado do Ceará. Até o ano de 2016, não contavam com nenhuma rede de monitoramento da qualidade do ar, mesmo abrigando desde 1995 em seus territórios, um complexo industrial e portuário rodeado por áreas habitadas com escolas, estabelecimentos comerciais com área aproximadamente de 133k m^2 (CEARÁ, 2013; SEMACE, 2017).

Para superar as lacunas deixadas pela ausência de monitoramento da qualidade do ar em diversas regiões do planeta, inclusive em regiões densamente industrializadas como a do

Complexo Industrial e Portuário do Pecem (CIPP), o uso de técnicas de sensoriamento remoto com o intuito de prever a concentração de $MP_{2,5}$ é uma alternativa eficaz e de baixo custo. A utilização da espessura ótica de aerossóis (AOD), a qual expressa a quantidade média de partículas da coluna atmosférica integrada, tem se mostrado adequada para esta finalidade devido a estimação de valores próximos aos mensurados (KUMAR, 2007; KUMAR, 2008; DONKELAAR, et al, 2010;).

Diversas metodologias com diferentes desempenhos, podem ser usadas nas estimativas do $MP_{2,5}$ através do AOD, como por exemplo, modelos de regressão não linear (RNL), modelos aditivos generalizados (MAG), modelos de efeito misto (MEM), modelos de transporte químico (MTQ), regressão geograficamente balanceada (RGB), entre outros (COBOURN, 2010; STRAWA et al, 2013; SONG et al, 2014; STIEB et al;2016; WANG; CHEN; 2016; ZHENG et al, 2016;). Para garantir uma maior robustez nos diversos modelos utilizados é importante incluir variáveis adicionais que podem influenciar a relação entre o AOD e a concentração $MP_{2,5}$, como por exemplo, dados meteorológicos de temperatura, umidade relativa e informações de uso de solo (LIU et al ^{a,b}, 2007).

Desta forma, o objetivo desta pesquisa é estimar a concentração diária do material particulado da fração de 2,5 micrômetro ($MP_{2,5}$) utilizando como variável preditora o produto AOD MODIS, através de um modelo de predição não linear aplicado aos municípios de Caucaia, São Gonçalo do Amarante, Paracuru e Paraipaba no estado do Ceará.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado em escala municipal e abrangeu os municípios de Caucaia, São Gonçalo do Amarante, Paracuru e Paraipaba. Os municípios foram divididos em três diferentes áreas de influência: Ai I, II e III. A definição das áreas de influência se baseou na direção preferencial dos ventos na região e em uma área de dispersão de 30km definida a partir do setor I do CIPP, área que atualmente abriga uma gama mais diversa de indústrias (Figura 1).

O município de São Gonçalo do Amarante foi definido como área de influência I, pois se encontra instalado em seu território, a Companhia Siderúrgica do Pecém e a termelétrica Energia Pecém. Os dois empreendimentos abrigam grandes depósitos de carvão mineral a céu aberto utilizado para a geração de energia.

Os municípios de Paracuru e Paraipaba foram definidos como a área de influência II por se localizarem na direção preferencial dos ventos na região, de maneira que a pluma de poluentes tende a dispersar em sua direção. Já o município de Caucaia foi definido como a área de influência III, pois este se encontra na direção oposta ao deslocamento preferencial dos ventos na região (Figura 1).

Aquisição dados MODIS – AOD

A coleta de dados de AOD foi realizada no aplicativo online – Geospatial Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure (GIOVANNI) que permite acesso a uma gama variada de dados de sensoriamento remoto de diferentes programas e missões espaciais da NASA. As informações adquiridas de AOD fornecidas no GIOVANNI são provenientes do sensor *Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo dos satélites Aqua e Terra. Ambos os satélites apresentam estes dados com resolução temporal diária e resolução espacial de 3km. O produto AOD coletado dos sensores MODIS foi o *Aerosol Optical Depth* 550 nm (Dark Target) no período de 01/01/2006 a 31/12/2017.

Para a coleta dos dados foi necessário selecionar as áreas dos municípios do estudo através de coordenadas geográficas traçadas a partir de um polígono norte, sul, leste, oeste. Desta forma, a área que compreende o Município de Caucaia foi demarcada como norte latitude -3.565851, sul latitude -3.992041, leste longitude -38.645648 e oeste longitude -38.997520. O município de São Gonçalo do Amarante foi definido como norte latitude -3.557242, sul latitude -3.696246, leste longitude -38.858943 e oeste longitude -39.314822. As áreas dos municípios

de Paracuru e Paraipaba foram delimitadas em um mesmo polígono, norte latitude -3.335093, sul latitude -3.530176, leste longitude -38.917054 oeste longitude -39.255959.

Aquisição dos dados meteorológicos

Para a estimativa da concentração de material particulado fino foi necessário obter informações meteorológicas sobre a temperatura média e umidade relativa média para ajuste dos modelos preditivos. Optou-se por utilizar dados mensurados e a solicitação das informações meteorológicas foi feita à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), nº protocolo – 0828307. Entretanto, dentre as três áreas de influência, somente as Ais I e III dispunham de estações meteorológicas, as quais não disponibilizaram informações para todo o período analisado.

Com isso foi necessário a coleta destas informações em uma estação meteorológica em região circunvizinha. E neste caso, os dados foram coletados da estação meteorológica de Fortaleza – CE (cód OMM: 82397). Trata-se de uma estação meteorológica convencional composta por diferentes instrumentos meteorológicos isolados que registram continuamente diversos dados como temperatura, umidade relativa, pressão atmosférica, entre outros. Está localizada na cidade de Fortaleza, estado do Ceará, latitude -3.81° e longitude -38.53° .

Para a coleta de dados da estação de Fortaleza, utilizou-se o banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa disponibilizado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), de onde foram coletadas as leituras diárias de temperatura (máxima, mínima e média compensada) e umidade relativa média para o período de 2006 a 2017.

Além dos dados de temperatura e umidade relativa, esta pesquisa utilizou informações sobre velocidade e direção preferencial dos ventos. Apesar de não constarem em nosso modelo de predição do $MP_{2,5}$ são úteis para entender a dinâmica dos poluentes na região. Estas informações foram obtidas através do site do Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA). Os dados só estavam disponíveis aos Municípios de Caucaia (PCD – 32322) e São Gonçalo do Amarante (PCD – 32325) para o período de 2006 a 2015.

Análise estatística

Este trabalho aplicou o modelo de predição das concentrações de $MP_{2,5}$ desenvolvido por Gonçalves (2016)²¹, que utiliza como termos as leituras diárias de AOD por satélite e dados meteorológicos de temperatura média (TEMP) e umidade relativa (RH). Trata-se de regressão não linear composta por função exponencial dos termos resultando em uma estimativa da

concentração média diária do $MP_{2,5}$.

O modelo considerou ainda os dados de AOD como polinômios de primeiro, segundo e terceiro grau (AOD, AOD^2, AOD^3) e, em seguida, considerou as variáveis meteorológicas como controle das estimativas de AOD ($TEMP, TEMP^2, RH, RH^2$).

Por fim, foram acrescentadas no modelo termos de interação entre AOD, AOD^2, AOD^3 e o seno e cosseno da variável dia para um período de 365,25 dias ($\cos.(days*2* \pi /365.25), \sin.(days*2* \pi /365.25)$). Este tipo de medida do seno e cosseno dos dias, ajuda a controlar as sazonalidades não esperadas no modelo, ou seja, que não estão presentes na forma de variáveis de controle. O modelo utilizado é descrito, a seguir:

$$MP_{2,5} = \exp(\alpha + \beta_1 \cdot AOD + \beta_2 \cdot AOD^2 + \beta_3 \cdot AOD^3 + \beta_4 \cdot (AOD \cdot TEMP) + \beta_5(AOD \cdot RH) + \beta_6(AOD \cdot TEMP^2) + \beta_7(AOD \cdot RH^2) + \beta_8(AOD \cdot \cos_days) + \beta_9(AOD \cdot \sin_days) + \beta_{10}(AOD^2 \cdot \cos_days) + \beta_{11}(AOD^2 \cdot \sin_days) + \beta_{12}(AOD^3 \cdot \cos_days) + \beta_{13}(AOD^3 \cdot \sin_days)$$

A performance deste modelo foi avaliada por Gonçalves em 2016, através da análise do coeficiente de determinação ajustado (R^2 adj), desvio padrão residual (RMSE), critério de informação de Akaike (AIC) e autocorrelação parcial dos resíduos por defasagens, proveniente da comparação do resultado das previsões do modelo e medições em solo do $MP_{2,5}$. O modelo final obteve valores de R^2 ajustado de 0.82, de desvio padrão residual de $8.60 \mu\text{gm}^{-3}$ e AIC de 4779.6.

Desta maneira, por se tratar de um modelo robusto para a região em que foi desenvolvido e ser relativamente simples de se trabalhar, decidiu-se por utiliza-lo para a predição diária do $MP_{2,5}$ nas áreas sob a influência do CIPP. Maiores informações sobre a estrutura e desenvolvimento do modelo podem ser encontradas em Gonçalves, (2016).

RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta a descrição das estimativas diárias de $MP_{2,5}$ em cada área de influência do CIPP estratificada no tempo para os períodos 2006 a 2010 e 2011 a 2017, Estado do Ceará. A concentração média estimada de $MP_{2,5}$ em todas as áreas de influência no período analisado foi de $8 \mu\text{g m}^{-3}$. As maiores concentrações estimadas ocorreram prioritariamente no período de 2011 a 2017. A área de influência I apresentou o maior pico de concentração ($44 \mu\text{g m}^{-3}$) e a área de influência II o menor com $25 \mu\text{g m}^{-3}$.

Considerando as variáveis meteorológicas, observou-se que a temperatura média variou entre 27° e 28°C e a máxima registrada alcançou 31°C . A umidade relativa variou entre 77 % e 78 % atingindo a máxima de 97 % (Tabela 2).

A Tabela 3 apresenta a correlação entre as variáveis meteorológicas e as concentrações previstas de $MP_{2,5}$. O comportamento encontrado na relação das variáveis analisadas foi moderado. O $MP_{2,5}$ apresentou correlação negativa entre a umidade relativa na Ai I (-0,41) e na Ai II e III (-0,46 em ambas as áreas). Já a correlação entre temperatura e as concentrações estimadas de $MP_{2,5}$ foi positiva com valores de 0.41 na Ai I, 0.44 na Ai II e 0.42 na Ai III.

O comportamento das concentrações estimadas de $MP_{2,5}$ apresentou padrão sazonal esperado. Quando se avalia em relação às estações do ano, as maiores concentrações foram registradas nos meses que compreendem a primavera (setembro a novembro) que é também um período de seca na região. Já as menores concentrações foram registradas no outono (março a maio) que também é um período de chuvas na região. A média da concentração estimada de $MP_{2,5}$ na primavera foi superior a $13 \mu\text{g m}^{-3}$ em todas as áreas de influência. Por outro lado, os meses do outono apresentaram as menores médias estimadas, estas, inferiores a $5 \mu\text{g m}^{-3}$. Durante a primavera, a Ai III apresentou as maiores concentrações seguida da Ai II e Ai I. Já no outono foi a Ai I que apresentou as maiores concentrações, seguida da Ai III e da Ai II (Figura 2)

A direção dos ventos nas áreas de influência I e III foram marcadas predominantemente por ventos do Leste principalmente nos meses de setembro a fevereiro (estações de primavera e verão) que foram justamente os meses de maior concentração de material particulado em todas as Ais. A primavera e o verão também foram as estações de maior média da velocidade dos ventos variando entre 10 e 14 m/s nas Ais III e I (Figuras 3 e 4).

DISCUSSÃO

O modelo utilizado nesta pesquisa foi construído a partir de uma regressão não linear, que utilizou como variáveis resposta polinômios das medidas de AOD, umidade relativa e temperatura média, e variáveis de controle sazonalidade e interação. Além do modelo utilizado nesta pesquisa existem diferentes formas de obter a estimativa da concentração média do MP_{2,5}, seja em escala municipal, nacional ou até global. Song e colaboradores (2015), estimaram a concentração de MP_{2,5} na cidade de Xi'an, na China, através de um modelo aditivo generalizado que explicou 69 % da variação da concentração do material particulado fino na região (SONG et al, 2015). Ainda na China, mas desta vez em uma escala nacional, em 2016 You e colaboradores desenvolveram um modelo de estimativa do MP_{2,5} que foi capaz de explicar 76 % da variação do material particulado, neste trabalho foi utilizada uma técnica de regressão ponderada geograficamente para estimar a concentração do material particulado (YOU et al, 2016). Até mesmo modelos mais complexos baseados em machine learning já foram aplicados na estimativa da concentração do MP_{2,5} (LARY, 2014). Com relação ao modelo aplicado nesta pesquisa, o fato de ter sido desenvolvido e avaliado no Brasil, apresentar um bom desempenho ($R^2 = 0.82$) explicando a variação do MP_{2,5} e se utilizar somente de duas covariáveis meteorológicas, foram pontos importantes para sua escolha. Foi necessário a coleta de somente três informações em bases de dados externas (AOD, temperatura média e umidade relativa média) para aplicação sua aplicação.

Nosso modelo de estimativa nos permitiu observar que as médias de concentração anual de MP_{2,5} não excedem o atual padrão nacional de qualidade do ar, apesar de existirem dias em que as concentrações médias diárias excederam as recomendações previstas na legislação. Apesar dos resultados referentes as médias anuais serem adequados perante a legislação vigente, é importante dizer que os padrões atualmente considerados seguros necessitam ser revistos (LIUHUA et al, 2016; NASCIMENTO et al, 2017). Inclusive, em 2015, a OMS reconheceu que há um crescente número de evidências demonstrando os impactos do MP_{2,5} à saúde em baixas concentrações e em curtos período de exposição (menor que 24 horas). E assim é importante rever e atualizar as bases de evidencias da OMS para que as futuras recomendações estejam mais alinhadas a estas novas descobertas (OMS, 2015).

Em nosso estudo foi possível observar que a correlação entre a variável umidade relativa e o MP_{2,5} foi negativa. Isso indica que nos dias de maior umidade relativa as concentrações tendem a ser menores. Este comportamento é semelhante ao que foi verificado por Lou e

colaboradores (2017). Os autores observaram uma forte influência da umidade relativa ($UR > 80\%$) na promoção de fatores que propiciam remoção de partículas finas do ambiente (LOU et al, 2017). Em contrapartida, a correlação entre temperatura e o $MP_{2,5}$ foi positiva, a qual também está de acordo com o comportamento observado por Wang e Ogawa (2015) que salientam diversos processos precursores do material particulado como dependentes da temperatura. Por conta disso, pode-se inferir que o aumento das concentrações está relacionado ao aumento da temperatura (WANG; OGAWA, 2015). Entretanto, como as relações entre os fatores meteorológicos e as partículas em suspensão variam de forma espaço-tempo este comportamento não é uma regra. Por exemplo, Li e colaboradores (2017) observaram uma correlação negativa entre temperatura e a concentração de $MP_{2,5}$. Neste caso, eles destacam que a influência da temperatura nos movimentos de massa de ar pode ter contribuído para o processo e dispersão do material particulado na região (LI et al, 2017).

Em todas as Ais foi observado um comportamento sazonal das partículas finas. As menores concentrações de $MP_{2,5}$ foram registradas nos últimos três meses na quadra chuvosa (meses da estação outono). No estado do Ceará, a quadra chuvosa se inicia em fevereiro (mês de transição do verão para o outono) e se estende até o final de maio (outono) (FUNCEME, 2018). Com isso, podemos supor que as baixas concentrações no período chuvoso (outono), podem estar relacionadas a processos de deposição do material particulado por conta da chuva e das características atmosféricas de maior umidade que podem contribuir para a remoção do $MP_{2,5}$. Em seu estudo Wu e colaboradores, (2018), observaram um efeito de deposição de $MP_{2,5}$ mais relacionado com a intensidade da chuva do que com a duração (WU et al, 2018). Desta forma, mesmo se as regiões de estudo apresentarem períodos com rápidas pancadas de chuva isso pode ser o suficiente para contribuir com a remoção do material particulado.

Além do comportamento sazonal das concentrações do material particulado na região, ao observarmos o comportamento da direção preferencial dos ventos nas Ais III e I (Figura 3 e 4) e o posicionamento geográfico de cada uma das Ais (Figura 1) percebemos que na Ai III a predominância de ventos norte, leste e lés-sudeste (especialmente nos meses de setembro a fevereiro) contribuiu para a dispersão de parte $MP_{2,5}$ em direção a Ai I. Seguindo este mesmo padrão, também nos meses de setembro a fevereiro há uma forte predominância de ventos leste na Ai I, o que contribuiu com o transporte dos particulados até a área de influência vizinha a oeste (Ai II).

Como consequência deste fluxo direcional bastante marcado dos ventos do sentido leste para oeste, e justamente nos meses em que se observam na região as maiores concentrações de

MP_{2,5}, a Ai II torna-se a receptora final do material particulado vindo das outras áreas de influência, Ai I e III. Como resultado deste processo, observa-se que nos meses de setembro a fevereiro, as médias de concentração de MP_{2,5} na Ai II se elevavam bastante e tornavam-se maiores do que na Ai I, que foi a área de influência que registrou a maior concentração de MP_{2,5} entre todas as outras e foi a que mantinha as maiores concentrações de material particulado durante os ciclos sazonais de baixa concentração (maio a agosto) (Figura 2).

A aplicação deste modelo permitiu estimar a poluição por material particulado fino nas três áreas de influência estudadas. Contudo, os modelos citados anteriormente como exemplo, utilizam-se de informações de uso de solo e leituras de material particulado mensurados para serem ajustados e validados. Já em nosso estudo este tipo de informação mensurada localmente não estava disponível. Com isso, não foi possível validar este modelo a partir de dados mensurados, elaborando uma equação própria às características meteorológicas da região.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa nos permitiu compreender que as áreas sob a influência do CIPP, Paracuru e Paraipaba (Ai II), São Gonçalo do Amarante (Ai I) e Caucaia (Ai III) apresentam médias anuais de concentração de estimada de MP_{2,5} abaixo do padrão estabelecido pela OMS e a legislação ambiental nacional vigente (CONAMA – 491/18). Porém, em todos os municípios houveram dias em que a concentração diária máxima excedeu o recomendado pelas já citadas legislações.

Com isso, cabe aqui fazer algumas recomendações, este trabalho serve para compor um cenário maior que inclui uma estimativa da concentração das partículas finas nas regiões de estudo, bem como a compreensão do comportamento destas partículas de acordo com os dados meteorológicos obtidos. Contudo é importante que leituras in loco das concentrações das partículas finas (MP_{2,5}) sejam realizadas em cada uma das áreas de estudo para que nossos resultados estimados sejam comparados e validados para estas regiões específicas.

Além da possibilidade de validação do modelo de predição, a medida da concentração do MP_{2,5} in loco podem permitir que os componentes químicos destas partículas sejam caracterizados. Este ponto demonstra-se importante pois a variada gama de elementos suspensos na atmosfera no entorno do CIPP, que são provenientes das atividades industriais lá desenvolvidas, pode vir a compor as partículas finas suspensas potencializando sua toxicidade.

Além disso, como objetivo de se monitorar a qualidade do ar é, em última instancia, garantir que não haja impactos negativos à saúde da população local é importante que se obtenham informações sobre uma possível associação entre a concentração estimada do MP_{2,5} e impactos a saúde destas populações expostas.

Figura 1: Destaque da localização do CIPP, suas áreas de influência e do Porto do Pecém. Estado do Ceará, Brasil.

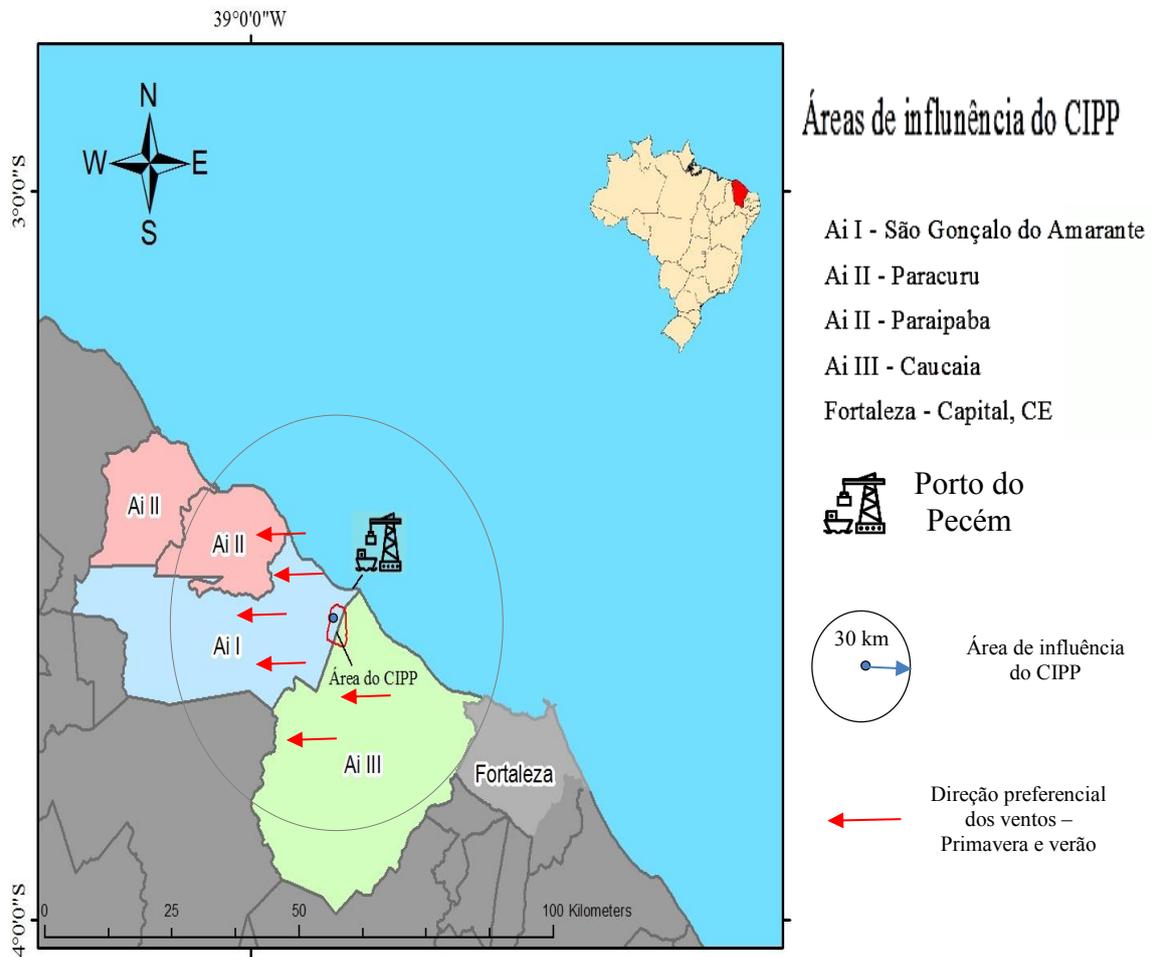


Tabela 1: Resumo estatístico das estimativas diárias de MP_{2,5} em cada área de influência do CIPP. Estado do Ceará, Brasil. Período: 2006 a 2010, e 2011 a 2017.

<i>Área de influência do CIPP</i>	<i>variável</i>	<i>Período</i>	<i>Média anual</i>	<i>DP</i>	<i>IQR</i>	<i>mín.</i>	<i>máx.</i>	<i>n</i>
Ai I	MP _{2,5} (µg m ⁻³)	2006-10	8	5	8	1	42	1826
		2011-17	8	6	8	1	44	2557
Ai II	MP _{2,5} (µg m ⁻³)	2006-10	8	5	10	1	25	1826
		2011-17	8	6	10	1	31	2557
Ai III	MP _{2,5} (µg m ⁻³)	2006-10	8	6	9	1	36	1826
		2011-17	8	6	9	1	37	2557

Fonte: AOD/ MODIS - Geospatial Interactive Online Visualization and analysis Infrastructure/ NASA. Temperatura média e umidade relativa - Instituto Nacional de Meteorologia.

Tabela 2: Resumo estatístico dos dados meteorológicos diários para cada área de influência do CIPP. Estado do Ceará, Brasil. Período: 2006 a 2010, e 2011 a 2017.

<i>Área de influência do CIPP</i>	<i>variável</i>	<i>Período</i>	<i>Média anual</i>	<i>DP</i>	<i>IQR</i>	<i>mín.</i>	<i>máx.</i>	<i>n</i>
Todas as Áreas de Influência	Temperatura (C°)	2006-10	27	1	1	23	30	1826
		2011-17	28	1	1	24	31	2557
	Umidade relativa (%)	2006-10	77	6	9	58	97	1826
		2011-17	78	6	8	62	97	2557

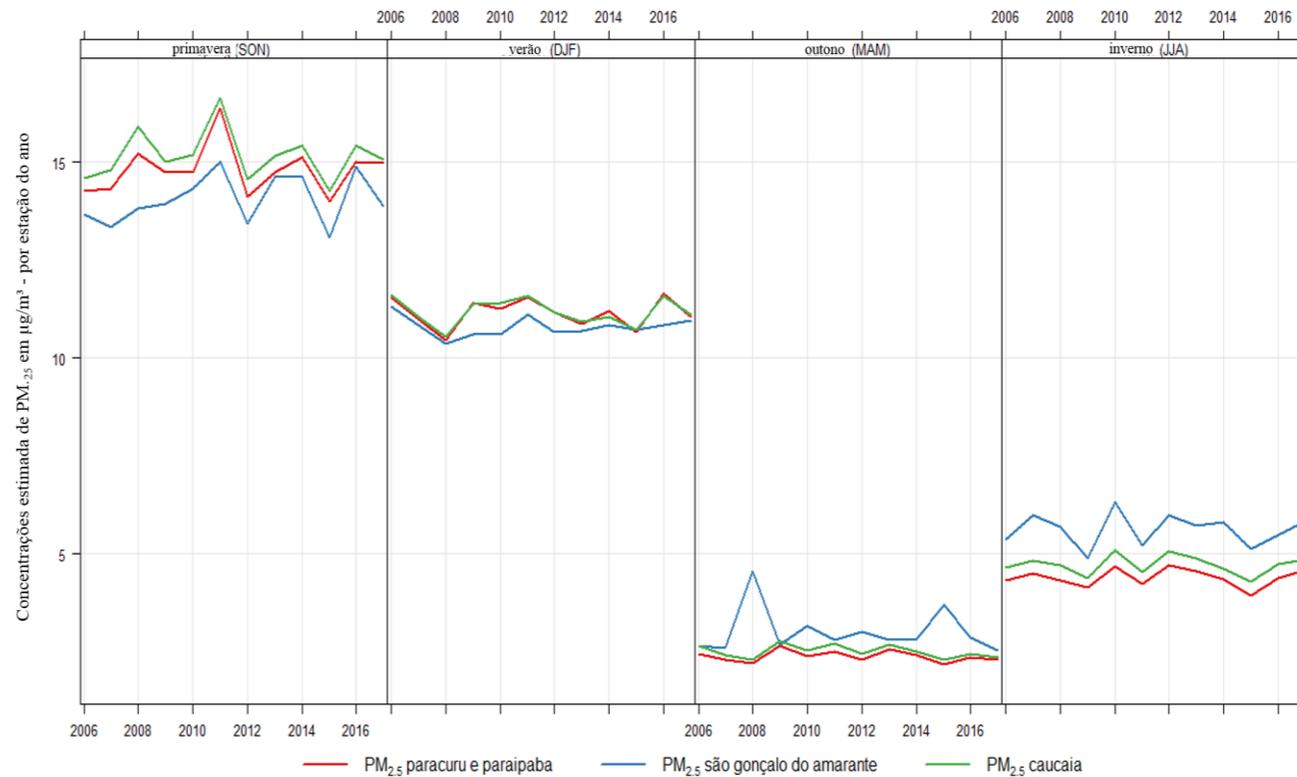
Fonte: Temperatura média, umidade relativa - Instituto Nacional de Meteorologia.

Nota: (a) As variáveis de temperatura e umidade relativa foram as mesmas em todos os três modelos.

Tabela 3: Correlação de Pearson entre as concentrações estimadas diárias de $MP_{2,5}$ estimadas e variáveis meteorológicas

Correlação de Pearson					
	<i>MP_{2,5} Ai I</i>	<i>MP_{2,5} Ai II</i>	<i>MP_{2,5} Ai III</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Umidade relativa</i>
<i>MP_{2,5} Ai I</i>	1.00				
<i>MP_{2,5} Ai II</i>	0.80	1.00			
<i>MP_{2,5} Ai III</i>	0.80	0.95	1.00		
Temperatura	0.33	0.44	0.42	1.00	
Umidade relativa	-0.41	-0.46	-0.46	-0.49	1.00

Figura 2: Distribuição das médias de concentração de $MP_{2,5}$ por estações do ano. Municípios de Paracuru, Paraipaba, São Gonçalo do Amarante e Caucaia. Estado do Ceará, Brasil. Período: 2006 a 2017.



Fonte: AOD/ MODIS - Geospatial Interactive Online Visualization and analysis Infrastructure/ NASA. Temperatura média e umidade relativa - Instituto Nacional de Meteorologia.

Nota 01: Ai I – São Gonçalo do Amarante, Ai II – Paracuru e Paraipaba, Ai III - Caucaia

Nota 02: Primavera S - setembro, O - outubro, N – novembro

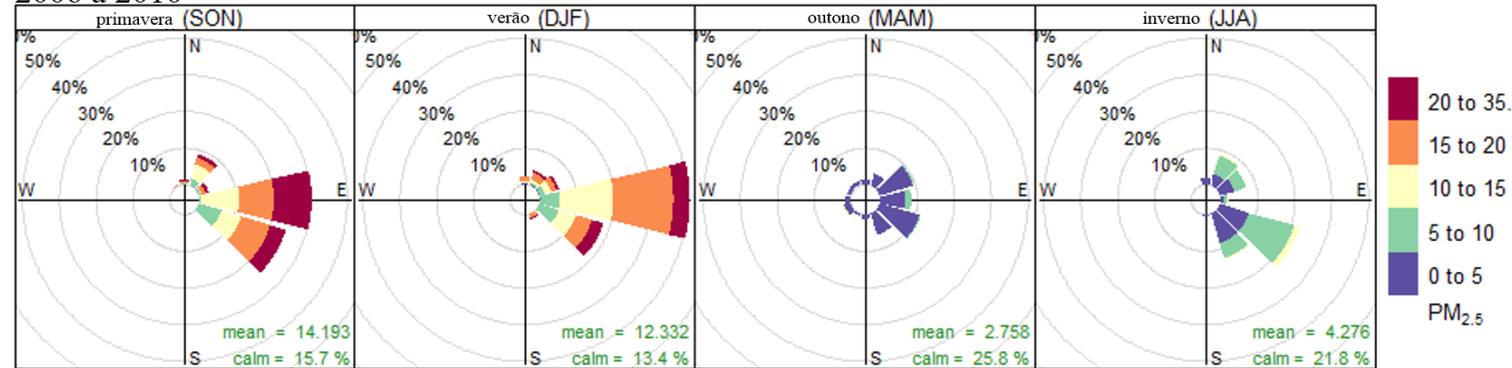
Verão D - dezembro, J - janeiro, F - fevereiro

Outono M - março, A - abril, M - maio

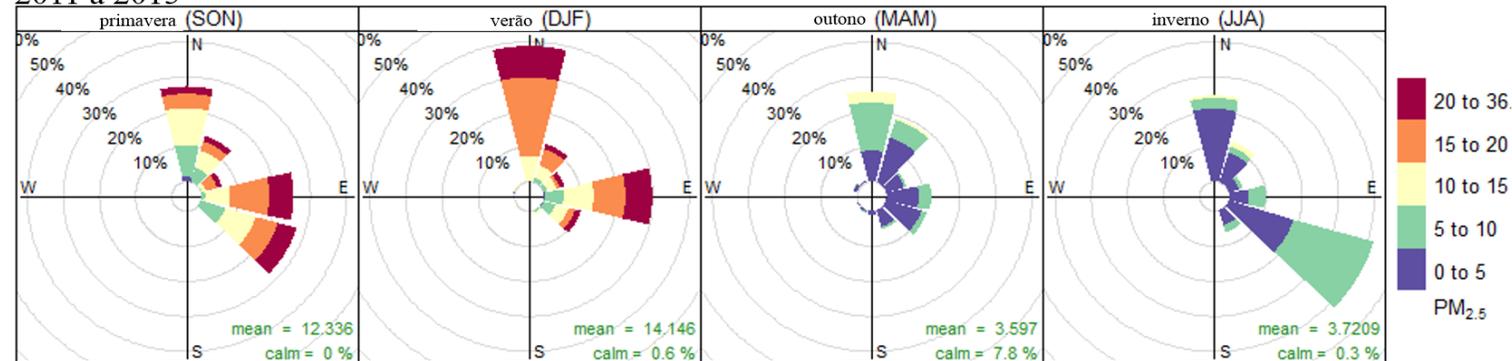
Inverno J - junho, J - julho, A – agosto

Figura 3: Rosa de poluição do município de Caucaia. Estado do Ceará, Brasil. Período: 2006 a 2015.

2006 a 2010



2011 a 2015



Fonte: AOD/ MODIS - Geospatial Interactive Online Visualization and analysis Infrastructure/ NASA. Temperatura média e umidade relativa - Instituto Nacional de Meteorologia. Direção e velocidade dos ventos – Sistema Integrado de Informações Ambientais.

Nota 01: Ai III – Caucaia – dados disponíveis somente no período de 2006 a 2015.

Nota 02: Primavera S - setembro, O - outubro, N – novembro

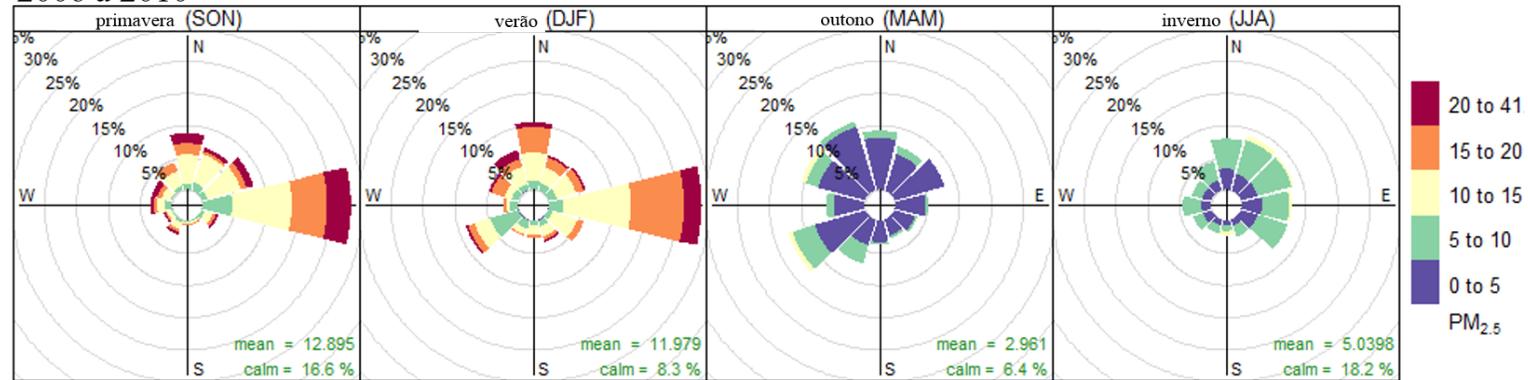
Verão D - dezembro, J - janeiro, F - fevereiro

Outono M - março, A - abril, M - maio

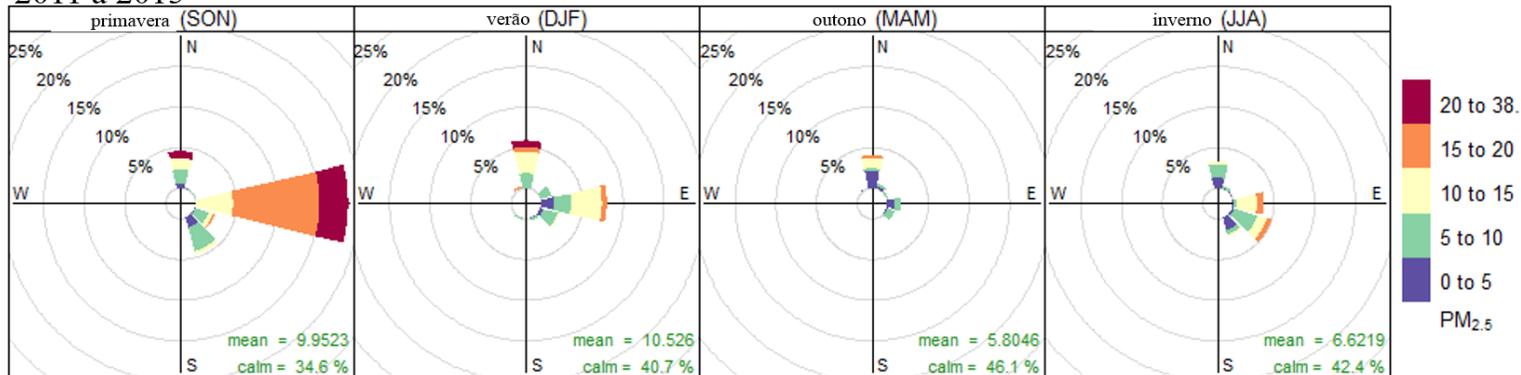
Inverno J - junho, J - julho, A – agosto

Figura 4: Rosa de poluição do município de São Gonçalo do Amarante. Estado do Ceará, Brasil. Período: 2006 a 2015

2006 a 2010



2011 a 2015



Fonte: AOD/ MODIS - Geospatial Interactive Online Visualization AND aNalysis Infrastructure/ NASA. Temperatura média e umidade relativa - Instituto Nacional de Meteorologia. Direção e velocidade dos ventos – Sistema Integrado de Informações Ambientais.

Nota 01: Ai I – São Gonçalo do Amarante – dados disponíveis somente no período de 2006 a 2015.

Nota 02: Primavera S - setembro, O - outubro, N - novembro

Verão D - dezembro, J - janeiro, F - fevereiro

Outono M - março, A - abril, M - maio

Inverno J - junho, J - julho, A - agosto

REFERÊNCIAS

BRASIL. **Resolução CONAMA nº3, de 28 de junho de 1990**. Padrões de Qualidade do Ar. Publicado no D.O.U. de 22/08/90, Seção I, p. 15.937 - 15.939.

_____. **Resolução CONAMA nº5, de 15 de junho de 1989**. Dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR. Publicada no DOU, de 25 de agosto de 1989, Seção I, p. 14.713 – 14.714.

CEARÁ. Assembleia Legislativa. **Cenário atual do complexo industrial e portuário do Pecém**. Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará; Eudoro Walter de Santana (Coordenador). Fortaleza: INESP, 2013 323p. Disponível em: <<https://www.al.ce.gov.br/phocadownload/cenarioatualPecem.pdf>> Acesso em: 13 out 2017.

COBOURN, W. G. An enhanced $MP_{2,5}$ air quality forecast model based on nonlinear regression and back-trajectory concentrations. **Atmospheric Environment**, v.44, n25, p. 3015–3023, 2010.

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Comportamento das chuvas no Ceará. Disponível em: <http://www.funceme.br/produtos/script/chuvas/Grafico_chuvas_postos_pluviometricos/totalchuvas/index.htm>. Acesso em: 28/11/2018

DONKELAAR, A. V. et al. Global Estimates of Ambient Fine Particulate Matter Concentrations from Satellite-Based Aerosol Optical Depth: Development and Application. **Environ Health Perspective**, v. 118, n. 6, p. 847-855, 2010.

FENG, S; et al. The health effects of ambient $PM_{2,5}$ and potential mechanisms. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. v.128, p.67 – 74, 2016.

FRUMKIN, H. Environmental health in the regional scale. in Environmental health: from global to local. 3ed. São Francisco CA, Jossey-Bass. 2016. cap. 13, p.466-498.

GONÇALVES, S. K. Cardiovascular diseases and the exposure to particulate air pollutants derived from forest fires in Porto Velho municipality, Rondonia state, Brazilian Amazon rain forest region. Tese (Doutorado em Saúde Pública) - Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca. Rio de Janeiro, p.79. 2016.

HEALTH EFFECTS INSTITUTE. Interactive data explorer. 2018. Disponível em: <<https://www.stateofglobalair.org/data/#/health/plot>>.

HEALTH EFFECTS INSTITUTE. State of Air 2018. Special Report. Boston, MA: Health Effects Institute. p.22, 2018. Disponível em: <<https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/soga-2018-report.pdf>> .

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. 1º Diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil. Brasília –DF, 2014. Disponível em:

<http://www.forumclima.pr.gov.br/arquivos/File/Rosana/Diagnostico_Qualidade_do_Ar_Versao_Final_Std.pdf> acesso em: 22 out. 2017.

KUMAR N.; CHU A, F. A. An empirical relationship between MP_{2,5} and aerosol optical depth in Delhi Metropolitan. **Atmos Environ**, v. 41, n.21, p.4492–4503, 2007.

KUMAR N.; CHU A. F. A. Remote sensing of ambient particles in Delhi and its environs: estimation and validation. **Int J Remote Sensing**, v.29 n.12, p.3383–3405, 2008.

LARY, D.J.; FARUQUE, F.S.; MALAKAR, N.; MOORE, A.; ROSCOE, B.; ADAMS, Z.L.; EGGELSTON, Y. Estimating the global abundance of ground level presence of particulate matter (PM_{2,5}). **Geospatial Health**, v.8, n.3, p.S611–S630, 2014.

LI, X.; FENG, Y. J.; LIANG, H. Y. The Impact of Meteorological Factors on PM_{2,5} Variations in Hong Kong. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 78, pp.10, 2017.

LIU, Y.; KOUTRAKIS, P.; KAHN, R. Estimating fine particulate matter component concentrations and size distributions using satellite-retrieved fractional aerosol optical depth: Part 1 – Method development. **Journ. Air. e Waste Manag. Assoc.**, v.57, p.1351–1359, 2007a.

LIU, Y.; KOUTRAKIS, P.; KAHN, R.; TURQUETY, S.; YANTOSCA, R. M. Estimating fine particulate matter component concentrations and size distributions using satellite-retrieved fractional aerosol optical depth: Part 2 – A case study. **Journ. Air. e Waste Manag. Assoc.**, v.57, p.1360–1369, 2007b.

SHI, L. et al. Low-Concentration MP_{2,5} and Mortality: Estimating Acute and Chronic Effects in a Population-Based Study. **Environmental Health Perspectives**, v.124, n.1, p.46-52, 2016.

LOU, C.; LIU, H.; LI, Y.; PENG, Y.; WANG, J.; DAI, L. (2017). Relationships of relative humidity with MP_{2,5} and MP₁₀ in the Yangtze River Delta, China. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.189, n.11, p.16, 2017.

NASCIMENTO A, P. et al. Associação entre a concentração de partículas finas na atmosfera com doenças respiratórias agudas em crianças. **Rev. Saúde. Pública.**,v.51, n.3, 2017.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). Evidencias disponíveis para atualizações futuras dos guias de qualidade do ar global. 48p, 2015. Disponível em: <<http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2016/who-expert-consultation-available-evidence-for-the-future-update-of-the-who-global-air-quality-guidelines-aqgs-2016>> acesso em: 23/11/2018.

SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE DO CEARÁ (SEMACE). Rede de Monitoramento da Qualidade do Ar. Disponível em: <<https://www.troposfera.es/br/referencias-2/siam-estado-de-ceara/contaminantes-quimicos-da-atmosfera.html>>.

SONG, W.; JIA, H.; HUANG, J.; ZHANG, Y. A satellite-based geographically weighted regression model for regional $PM_{2,5}$ estimation over the Pearl River Delta region in China. **Remote Sens. Environ.**, v.154, p.1–7, 2014.

SONG, Y.Z.; YANG, H.L.; PENG, J.H.; SONG, Y.R.; SUN, Q.; LI, Y. Estimating $PM_{2,5}$ concentrations in Xi'an city using a generalized additive model with multi-source monitoring data. **PLoS ONE**, v.10, n.11, 2015.

STIEB, D.M. et al. Associations of pregnancy outcomes and MP in a national Canadian study. **Environmental Health Perspective** v.124, p.243–249, 2016.

STRAWA, A.W.; Chatfield, R.B.; Legg, M.; Scarnato, B.; Esswein, R. Improving retrievals of regional fine particulate matter concentrations from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) and ozone monitoring instrument (OMI) multisatellite observations. **J. Air e Waste Manag. Assoc.**, v.63, p.1434–1446, 2013.

WANG, B.; CHEN, Z. High-resolution satellite-based analysis of ground-level $PM_{2,5}$ for the city of Montreal. **Science of the Total Environment**, v.541, p.1059–1069, 2016.

WANG, J.; OGAWA, S. Effects of Meteorological Conditions on $PM_{2,5}$ Concentrations in Nagasaki, Japan. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v.12, n.8, p. 9089-9101, 2015.

WU, Y. et al. Comparison of dry and wet deposition of particulate matter in near-surface waters during summer. **PLOS ONE** v.13, n.6, 2018.

YOU, W.; ZANG, Z.; ZHANG, L.; LI, Y.; WANG, W. Estimating national-scale ground-level $PM_{2,5}$ concentration in china using geographically weighted regression based on MODIS and MISR AOD. **Environ. Sci. Pollut. Res. Int.**, v.23, p.8327–8338, 2016.

ZHENG, Y.; ZHANG, Q.; LIU, Y.; GENG, G.; HE, K. Estimating ground-level $PM_{2,5}$ concentrations over three megalopolises in china using satellite-derived aerosol optical depth measurements. **Atmos. Environ.**, v.124, p.232–242, 2016.

Impactos das concentrações médias diárias de material particulado fino na saúde da população do entorno do Complexo Industrial e Portuário do Pecém “Não submetido”

Resumo

CONTEXTO: A poluição por material particulado com menos de 2,5 micrômetros ($MP_{2,5}$) representam uma grande ameaça à população exposta. As frações menores de material particulado estão mais associadas aos desfechos em saúde devido sua capacidade de penetrar mais profundamente no sistema respiratório. Os piores impactos do $MP_{2,5}$ podem ser observados nas áreas de aglomeração industrial devido a diversidade de elementos emitidos que podem potencializar os efeitos tóxicos das partículas suspensas nestas regiões.

OBJETIVO: Investigar a associação entre o $MP_{2,5}$ e os óbitos por Doenças do Aparelho Respiratório e determinar a variação percentual do risco relativo de óbito associado ao aumento de $10 \mu\text{g m}^{-3}$ nas áreas de influência (Ai) do complexo industrial e portuário do Pecém, Ceará.

MÉTODO: Nesta pesquisa foi aplicado um modelo aditivo generalizado da família Poisson para analisar a relação entre a concentração diária estimada de $MP_{2,5}$ e a contagem diária de óbitos por doenças do aparelho respiratório nos Municípios de São Gonçalo do Amarante (Ai I), Paracuru e Paraipaba (Ai II), Caucaia (Ai III) no período de 2006 a 2017.

RESULTADOS: A concentração média anual estimada de $MP_{2,5}$ em todas as áreas de influência foi de $8 \mu\text{g m}^{-3}$. As taxas de óbito foram crescentes em todas as Ais, com destaque para o período de 2011 a 2017. O período de 2011 a 2017 foi o mais significativo para este estudo. No mesmo período, a significância estatística do $MP_{2,5}$ nos modelos MAG foi observada em todas as Ais, bem como a amplitude da variação percentual do risco relativo foi maior.

CONCLUSÃO: Apesar das concentrações médias anuais estarem de acordo com o recomendado pela legislação ambiental vigente, foi possível observar que na região a variação percentual do risco relativo de óbito por DAR associado ao incremento de $10 \mu\text{g m}^{-3}$ de $MP_{2,5}$ foi sempre positivo, e mais acentuado quando o incremento na concentração de $MP_{2,5}$ ocorria a partir de concentrações mais baixas, entre 1 e $15 \mu\text{g m}^{-3}$. Este comportamento foi levemente acentuado a partir de 2011, período em que na região a aglomeração das atividades industriais era maior, e em especial na Ai II.

Palavras-chave: Qualidade do ar, material particulado fino, efeitos adversos, doenças do aparelho respiratório, empreendimentos industriais, profundidade óptica do aerossol.

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, a expansão urbana e o atual padrão de consumo, alicerçado no incremento da produção industrial, contribuem de maneira significativa para o aumento da emissão de poluentes atmosféricos. A poluição atmosférica é entendida como o processo, antrópico ou natural, de emissão de gases, líquidos ou sólidos na atmosfera em níveis suficientes para causar danos a materiais, à saúde humana, à fauna e à flora (RAVEN et al, 2010).

As fontes de poluição por material particulado (MP) são múltiplas e incluem, mas não se limitam a processos industriais, trânsito de veículos, queima de combustíveis industriais, queima de matéria orgânica e geração de energia termelétricas (GANEM, 2015). A composição do material particulado também é variada e pode conter substâncias orgânicas, metais e outras substâncias inorgânicas perigosas (FRUMKIN, 2016).

A poluição por material particulado com menos de 2,5 micrômetros ($MP_{2,5}$) representam uma grande ameaça à população e os eventos em saúde associados à essa exposição são variados, como por exemplo, inflamação das vias respiratórias, declínio da função pulmonar, exacerbação de casos de asma e doença pulmonar obstrutiva crônica, diminuição da capacidade imune dos pulmões, morbimortalidades cardiovasculares, e até o desenvolvimento de diabetes mellitus (BELL, M.L, 2012; FENG, 2016; COHEN, 2017).

De fato, as frações menores de material particulado estão mais associadas aos desfechos em saúde que as frações maiores, e segundo o Health Effects Institute em 2016 o $MP_{2,5}$ foi classificado como o sexto maior risco de mortalidade prematura no mundo, contribuindo para a morte de aproximadamente 4 milhões de pessoas (Health Effects Institute^a, 2018). No Brasil, o número de mortes atribuídas ao $MP_{2,5}$ chegou a 50.300 óbitos em 2017, e com isso, o Brasil foi o país da América Latina com o maior número de morte atribuídas ao $MP_{2,5}$ (Health Effects Institute^b, 2018).

Os piores impactos do $MP_{2,5}$ são observados nos grandes centros urbanos e nas áreas de aglomeração industrial. Uma importante aglomeração industrial do Brasil está instalada nos municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante no Ceará. O Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) ocupa uma área de aproximadamente 133km² e abriga empreendimentos siderúrgicos, termelétricos movido a carvão mineral, portuários, petroquímicos, metalomecânicos, entre outros (CEARÁ, 2013).

O CIPP é rodeado por áreas residenciais, escolas, e demais empreendimentos pertencentes aos distritos que fazem divisa com limites do complexo, de maneira que esta é uma área com centenas de indivíduos expostos às emissões de particulados provenientes das

atividades industriais presentes neste complexo. Neste contexto, esta pesquisa pretende investigar a associação entre o $MP_{2,5}$ e óbito por Doenças do Aparelho Respiratório e a variação percentual do risco de óbito associado ao aumento de $10\mu\text{gm}^{-3}$ nos Municípios de Caucaia, São Gonçalo do Amarante, Paracuru e Paraipaba.

MATERIAIS E MÉTODOS

Áreas de estudo

O estudo foi realizado em escala municipal e abrangeu os municípios de Caucaia, São Gonçalo do Amarante, Paracuru e Paraipaba, sendo estes definidos como as áreas de influência do CIPP e de interesse para este estudo. Os municípios foram divididos em três diferentes áreas de influência. A definição das áreas de influência se baseou na direção preferencial dos ventos na região e em uma área de dispersão de 30km definida a partir do setor I do CIPP, área que atualmente abriga uma gama mais diversa de indústrias.

O município de São Gonçalo do Amarante foi definido como área de influência I já que abriga o setor I do CIPP, que tem instalado em seu território a Companhia Siderúrgica do Pecém e a termelétrica Energia Pecém. Os dois empreendimentos abrigam grandes depósitos de carvão mineral a céu aberto utilizado para a geração de energia.

Os municípios de Paracuru e Paraipaba foram definidos como a área de influência II (Ai II) já que eles estão na direção preferencial dos ventos na região (ventos do leste para oeste, principalmente nos meses de setembro a fevereiro). Já o município de Caucaia se encontra no sentido oposto à direção preferencial dos ventos e foi definido como a área de influência III (Ai III) (figura 1).

Coletas de dados

Os dados diários sobre mortalidade para o período de 01/01/2006 a 31/12/2017 foram obtidos através do acesso ao banco de dados de mortalidade do departamento de informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS) concedido pela Secretaria de Saúde do Estado do Ceará. Os bancos requisitados foram os de doenças do aparelho respiratório, CID 10 (cap. X), para cada um dos municípios do estudo: Paracuru, Paraipaba, São Gonçalo do Amarante e Caucaia.

Os dados diários de concentrações de material particulado da fração de 2,5 micrômetros foram estimados para os municípios estudados, os quais foram agrupados em três áreas. Paracuru e Paraipaba estão na mesma área (Ai II), Caucaia e São Gonçalo do Amarante estão em áreas distintas, Ai III e Ai I, respectivamente. Foi utilizado o modelo não linear de predição das concentrações de $MP_{2,5}$, desenvolvido por Gonçalves (2016). Neste modelo, se utiliza medidas diárias da profundidade óptica do aerossol (AOD) produzidas pelo sensor MODIS, a bordo dos satélites Aqua e Terra captadas para cada uma das regiões

de estudo Ai I, Ai II e Ai III. O modelo inclui também dados meteorológicos de temperatura média e umidade relativa média diária.

Optou-se por utilizar dados meteorológicos mensurados e a solicitação das informações foi feita à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), nº protocolo – 0828307. Entretanto, dentre as três áreas de influência, somente as Ais I e III dispunham de estações meteorológicas que, no entanto, não disponibilizaram informações meteorológicas para todo o período analisado neste estudo.

Com isso foi necessário a coleta destas informações em uma estação meteorológica em região circunvizinha. Os dados foram coletados da estação meteorológica de Fortaleza – CE (cód OMM: 82397). Trata-se de uma estação meteorológica convencional composta por diferentes instrumentos meteorológicos isolados que registram continuamente diversos dados como temperatura, umidade relativa, pressão atmosférica, entre outros. Está localizada na cidade de Fortaleza, estado do Ceará, latitude -3.81° e longitude -38.53° .

Para a coleta de dados da estação de Fortaleza, utilizou-se o banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa disponibilizado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), onde foram coletadas as leituras diárias de temperatura (máxima, mínima e média compensada) e umidade relativa média para o período de 2006 a 2017.

Além dos dados de temperatura e umidade relativa, esta pesquisa utilizou informações mensuradas sobre velocidade e direção preferencial dos ventos. Apesar de não constarem em nosso modelo de predição do $MP_{2,5}$ são úteis para entender a dinâmica dos poluentes na região. Estas informações foram obtidas através do site do Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA). Havia somente dados relativos aos Municípios de Caucaia (PCD – 32322) e São Gonçalo do Amarante (PCD – 32325) e somente no período de 2006 a 2015.

Variação percentual do Risco Relativo

Para trabalhar com os dados diários de mortalidade por doenças do aparelho respiratório (DAR) e da concentração estimada de $MP_{2,5}$ foi utilizado um modelo aditivo generalizado de regressão da família *poisson*.

Um modelo de regressão múltipla se demonstra inadequado para nosso estudo devido ao fato de nossas variáveis respostas serem de eventos raros, contagem diária de mortalidade por DAR. Desta forma, a hipótese de distribuição normal não seria verdadeira. Os modelos

aditivos generalizados são adequados para nosso estudo, pois são menos rígidos com relação ao comportamento da variável resposta. Suportam em sua modelagem covariáveis defasadas no tempo e são capazes de trabalhar com variáveis explicativas que não tenham uma relação linear com a variável resposta.

Modelo final:

$$\text{DAR} = s(\text{MP}_{2,5}, \text{bs}=\text{"cr"}, k=4) + s(\text{matmed}, \text{bs}=\text{"cr"}, k=2) + s(\text{time}, \text{bs}=\text{"cr"}, k=11) + \text{as.factor}(\text{dow}) + \text{holiday} + \text{ur}$$

Onde, α representa o intercepto, “s” é o *spline* (alisador), o termo “bs” define o tipo de spline utilizado que no caso é o *cubic regression spline* (cr), e K é o número de nós utilizado no spline. Desta forma, foram utilizados splines nas variáveis $\text{MP}_{2,5}$, na média móvel da temperatura média (matemed) e na variável centralizadora da série (time).

A variável “dow” representa os dias da semana, o termo “holiday” representa as informações sobre feriados e a variável “ur” agrupa informações sobre a umidade relativa média diária.

Para controle da sazonalidade de longa e de curta duração foram inseridas no modelo os termos de centralização da série, informações sobre o dia da semana, na forma de variáveis dummy, e feriados.

Os resultados desta análise serão reportados na forma da variação percentual do risco relativo de óbito para cada aumento de $10 \mu\text{g m}^{-3}$, e seus respectivos intervalos de confiança (IC 95%), de cada uma das regiões de estudo. A seleção dos modelos de risco relativo foi feita pela avaliação do R^2 , valores de Akaike (AIC), comportamento dos resíduos e significância da variável spline ($\text{MP}_{2,5}$). Foi utilizada a biblioteca *mgcv* do r para a análise dos modelos.

RESULTADOS

A concentração média anual de $MP_{2,5}$ em todas as áreas de influência e em todos os períodos foi de $8\mu\text{g m}^{-3}$. As maiores concentrações estimadas ocorreram prioritariamente no período de 2011 a 2017. A área de influência I apresentou o maior pico de concentração ($44\mu\text{g m}^{-3}$), e a área de influência II o menor com $25\mu\text{g m}^{-3}$ (Figura 2).

Em todas as Ais os óbitos foram crescentes, fato que se refletiu nas taxas de óbito. Destaque para a Ai II, em que a taxa de óbito quase dobrou quando se compara o período de 2006 a 2010 e 2011 a 2017, variação percentual de 96% entre os períodos. Além disso, a Ai II também sofreu uma transição de área com a menor taxa entre 2006 a 2010 e passou a apresentar a maior taxa no período de 2011 a 2017 (Tabela 1).

O modelo aditivo generalizado demonstrou que há uma associação entre a exposição ao $MP_{2,5}$ e os óbitos por DAR nas Ais do CIPP. O modelo apresentou significância estatística do estimador, $MP_{2,5}$ (p-valor $< 0,01$), em todas as Ais quando se observa o período de 2011 a 2017 (Tabela 3). No período anterior (2006 a 2010) somente na Ai III o modelo demonstrou significância estatística (p-valor $< 0,05$) para o $MP_{2,5}$ (Tabela 2). Também no período de 2011 a 2017, o primeiro dia de exposição foi significativo para a Ai II (p-valor $< 0,05$) e o terceiro dia de exposição foi o mais significativo ($< 0,05$) na Ai II. Na Ai III não foi possível observar um dia de exposição que se destaque como mais significativo neste período (2011 a 2017) (Tabela 3).

As informações descritivas sobre a mediana e os valores referentes a variação percentual do risco relativo (RR) estão apresentados na figura 3. De maneira geral, a variação percentual do risco relativo associado ao incremento de $10\mu\text{g m}^{-3}$ em todas as Ais foi maior a partir de baixas concentrações (entre 1 e $15\mu\text{g m}^{-3}$), este comportamento provavelmente esteja ligado ao fato de que menos de 10% das concentrações diárias estimadas nas Ais ultrapassaram a média de $25\mu\text{g m}^{-3}$. Além disso, no período de 2011 a 2017, a amplitude da variação percentual do RR foi maior em todas as Ais se comparado ao período anterior com destaque para a Ai II (Figura 3).

Na Ai I, no período de 2006 a 2010, o aumento percentual do risco relativo foi estável em 11% quando consideradas as concentração com limiares de 1 e $15\mu\text{g m}^{-3}$. Isso indica que em uma concentração média de $1\mu\text{g m}^{-3}$, com o acréscimo de $10\mu\text{g m}^{-3}$ de $MP_{2,5}$ o risco relativo de óbito seria 11% maior do que se a concentração se mantivesse a mesma ($1\mu\text{g m}^{-3}$), o mesmo vale para concentrações médias de $15\mu\text{g m}^{-3}$. Na Ai II, o incremento de $10\mu\text{g m}^{-3}$

³ em uma concentração de $1\mu\text{gm}^{-3}$ também aumentava o risco de óbito por DAR em 11% e na Ai III a variação percentual do risco relativo de óbito por DAR, nas mesmas condições descritas anteriormente, era 10% maior do que se a concentração se mantivesse a mesma (Tabela 4).

Já no período de 2011 a 2017, em uma concentração média de $1\mu\text{gm}^{-3}$, com o acréscimo de $10\mu\text{gm}^{-3}$ de $\text{MP}_{2,5}$ o risco relativo de óbito por DAR na Ai I seria 14% maior, na Ai II seria 15% maior e na Ai III seria 12% maior, do que se as respectivas Ais mantivessem a mesma concentração de referencia ($1\mu\text{g m}^{-3}$) (Tabela 4).

DISCUSSÃO

O modelo de estimativa da concentração média diária do $MP_{2,5}$ permitiu observar que as médias de concentração anual de $MP_{2,5}$ não excedem o atual padrão nacional de qualidade do ar, todavia existiram dias em que as concentrações médias diárias excederam as recomendações previstas na legislação. Apesar dos resultados referentes as médias anuais serem adequados perante a legislação vigente, vale ressaltar que do ponto de vista da saúde, estes padrões considerados seguros já não são mais tão eficientes quanto se imagina. Até mesmo a OMS já reconhece o crescente número de evidencias demonstrando efeitos adversos do $MP_{2,5}$ em baixas concentrações e já destacou que pretende incorporar estas novas evidencias no conjunto de dados utilizados para definir os futuros padrões de qualidade do ar (OMS, 2015).

Pudemos observar que o período de 2011 a 2017 foi o mais significativo para este estudo. A significância estatística do $MP_{2,5}$ e as maiores variações percentuais do risco relativo foram observadas em todas as Ais, neste período. Diferentes fatores podem estar envolvidos neste processo, porém as fontes industriais de $MP_{2,5}$ na região merecem destaque. ZHU e colaboradores (2018) fizeram um levantamento das fontes de $MP_{2,5}$ na China e destacaram que as atividades industriais são importantes contribuintes para a emissão de material particulado fino no País. Inclusive, destacaram que no norte da China no período de 1980 a 2006 (anterior à industrialização da região) os maiores contribuintes do $MP_{2,5}$ foram a poeira (25%), aerossóis inorgânicos secundários (23%), e combustíveis fósseis (18%). A partir de 2007, a industrialização na região se acentua e as fontes industriais passaram a ser a principal fonte de emissão de $MP_{2,5}$ na região (28%) seguidas dos aerossóis inorgânicos secundários (26%) e poeira (17%).

Este padrão descrito por ZHU (2018), suporta a hipótese da importância que as fontes industriais de $MP_{2,5}$ exercem na região do CIPP. Tanto a Ai I quanto a III abrigam diversas indústrias em seu território. O número de indústrias instaladas na Ai I subiu de 23 em 2008 para 50 em 2011, e em 2017 foram 154 (PINHEIRO, 2018). Somente na área do CIPP existem 28 indústrias que estão distribuídas entre o território da Ai I e III. Dentre as indústrias que compõem o CIPP existem cimenteiras, siderúrgicas, termelétricas (movidas a carvão mineral), produtoras de fertilizantes, entre outras que sabidamente emitem material particulado durante suas atividades.

A diversidade de fontes poluidoras reunidas em somente uma região podem contribuir para a produção de partículas com as mais diversas composições, fator que pode

maximizar os efeitos adversos destes poluentes mesmo em baixas concentrações. Por exemplo, Vedantham e colaboradores (2014) destacam que o $MP_{2,5}$ emitido na queima de carvão, geralmente está associado a moléculas de enxofre que é conhecida por causar respostas severas no sistema respiratório.

O fato da significância do estimador ($MP_{2,5}$) e os óbitos por DAR serem observados na Ai I e II somente nos períodos de 2011 a 2017 apesar desta significância ser observada em ambos os períodos na Ai III, sugere que as fontes industriais de emissão de material particulado que foram atraídas para as áreas de estudo têm um papel importante no comportamento da variação do RR nas Ais. A Ai III é uma região bastante industrializada para além do CIPP (tinha mais de 350 empresas industriais já em 2010) e que recebe também o aporte de poluentes vindos de Fortaleza devido a direção preferencial dos ventos na região (ventos de leste para oeste) e por isso, os impactos já eram perceptíveis em ambos os períodos de estudo nesta região. Somente a partir de 2011, quando o número de fontes industriais emissoras de $MP_{2,5}$ aumenta na região (especialmente na Ai I) é que fica ainda mais evidentes os impactos a saúde, principalmente na Ai II que apesar de ser uma área pouco industrializada, se torna uma potencial receptora de todas as partículas carregadas pelos ventos do leste (Figura 1).

Apesar da diferença entre os períodos de estudo, seja do ponto de vista do número de emissores industriais de $MP_{2,5}$ e do comportamento da amplitude na variação do RR, as concentrações estimadas de material particulado estavam abaixo do estabelecido pela legislação vigente. Porém, nossos resultados são corroborados por diferentes estudos que observaram os impactos adversos à saúde do $MP_{2,5}$ em baixas concentrações. Na região da Grande Vitória - ES, Nascimento e colaboradores (2017) observaram a associação entre a exposição ao $MP_{2,5}$ e a internação de crianças por doenças respiratórias agudas, com $RR=1,04$ ($IC = 0,990 - 1,089$) para a exposição no dia corrente. Em todo o período analisado, a concentração média de $MP_{2,5}$ foi de $12\mu g m^{-3}$, valor próximo ao encontrado em nosso estudo. Entretanto, ainda dentro dos limites estabelecidos pela OMS e resolução CONAMA.

Shi e colaboradores (2016) realizaram um estudo em New England e analisaram especificamente os efeitos sobre a exposição ao $MP_{2,5}$ em baixas concentrações e mortalidade geral. O incremento do risco de óbito foi de 2% ($IC \pm 0.81$) para cada aumento de $10\mu g m^{-3}$. Nesta pesquisa, os autores utilizaram como referência limites estabelecidos pela Agencia de Proteção Ambiental dos Estado Unidos da América - U.S.EPA ($12\mu g m^{-3}$ de média diária e $30\mu g m^{-3}$ de média anual). Crouse e colaboradores (2012) observaram no

Canadá, a associação entre mortalidade por diferentes doenças cardiovasculares e a exposição e baixas concentrações de $MP_{2,5}$. Este estudo foi baseado em uma coorte, a qual incluiu apenas indivíduos canadenses e com idade superior a 25 anos. As concentrações anuais médias foram de $8\mu g m^{-3}$, sendo estas semelhantes ao que Shi et al. (2016) encontrou e ao que observamos em nosso estudo.

Nossos resultados convergem para a ideia de que seria importante realizar uma avaliação da composição das partículas nestas regiões para esclarecer quais componentes compõem as partículas suspensas na região, uma vez que já foi observada uma associação entre o $MP_{2,5}$ e os óbitos por DAR mesmo em concentrações baixas.

Para a estimativa da variação percentual do risco de óbito por doenças do aparelho respiratório associada ao incremento do $MP_{2,5}$ optamos por aplicar um modelo de regressão aditiva generalizada (MAG), outra forma de trabalhar com os dados de contagem de óbito seriam os modelos lineares generalizados (MLG), por exemplo. Porém, conforme destacado por Conceição e colaboradores (2001) a abordagem do MAG, baseada em alisadores, nos permite um ajuste menos rígido dos efeitos das variáveis meteorológicas e das tendências temporais e sazonais estabelecendo relações mais adequadas no modelo. Estes são os típicos confundidores deste tipo de desenho de estudo já que apresentam variação diária (CASTRO, 2003).

Outro fator importante a se avaliar em um estudo epidemiológico ambiental como este, é a análise do efeito da defasagem (lag). Os efeitos de uma exposição não acontecem necessariamente no momento em que ela ocorre podendo manifestar-se em algum período posterior. Este tipo de análise não foi abordada nesta pesquisa, porém pode ser realizada em um estudo complementar. Este tipo de análise permite observar possíveis efeitos de colheita, e o efeito defasado da exposição sobre os óbitos por DAR.

O modelo utilizado para a estimativa da concentração média diária do $MP_{2,5}$ foi construído a partir de uma regressão não linear, que utilizou como variáveis resposta polinômios das medidas de AOD, umidade relativa e temperatura média, e variáveis de controle sazonalidade e interação. Além do modelo utilizado nesta pesquisa existem diferentes formas de obter a estimativa da concentração média do $MP_{2,5}$ (CHU et al, 2016). Uma das vantagens do modelo utilizado está na capacidade de produzir as estimativas utilizando poucas variáveis provenientes de bancos externos ou de equipamentos de mediação (AOD, temperatura média e umidade relativa) e ainda sim conseguir um bom resultado na estimativa (R^2 0.82). Uma das limitações do uso deste tipo de modelo é a

dificuldade de se trabalhar com dados sobre o uso de solo de maneira mais específica, como cobertura vegetal, altitude, presença ou não de aglomeração urbana entre outras informações. Estes dados são melhor trabalhados em modelos de Land Use Regression e Geographically Weighted Regressions.

CONCLUSÃO

Apesar das concentrações médias anuais baixas ($8 \mu\text{g m}^{-3}$), observou-se uma variação percentual do risco relativo de óbito por DAR sempre positiva e maior em baixas concentrações. A amplitude da variação RR foi maior no período de 2011 a 2017 e a área de influência II, apesar de menos industrializada, apresentou resultados levemente maiores que as demais AIs.

Figura 1: Destaque da localização do CIPP, suas áreas de influência e do Porto do Pecém. Estado do Ceará, Brasil.

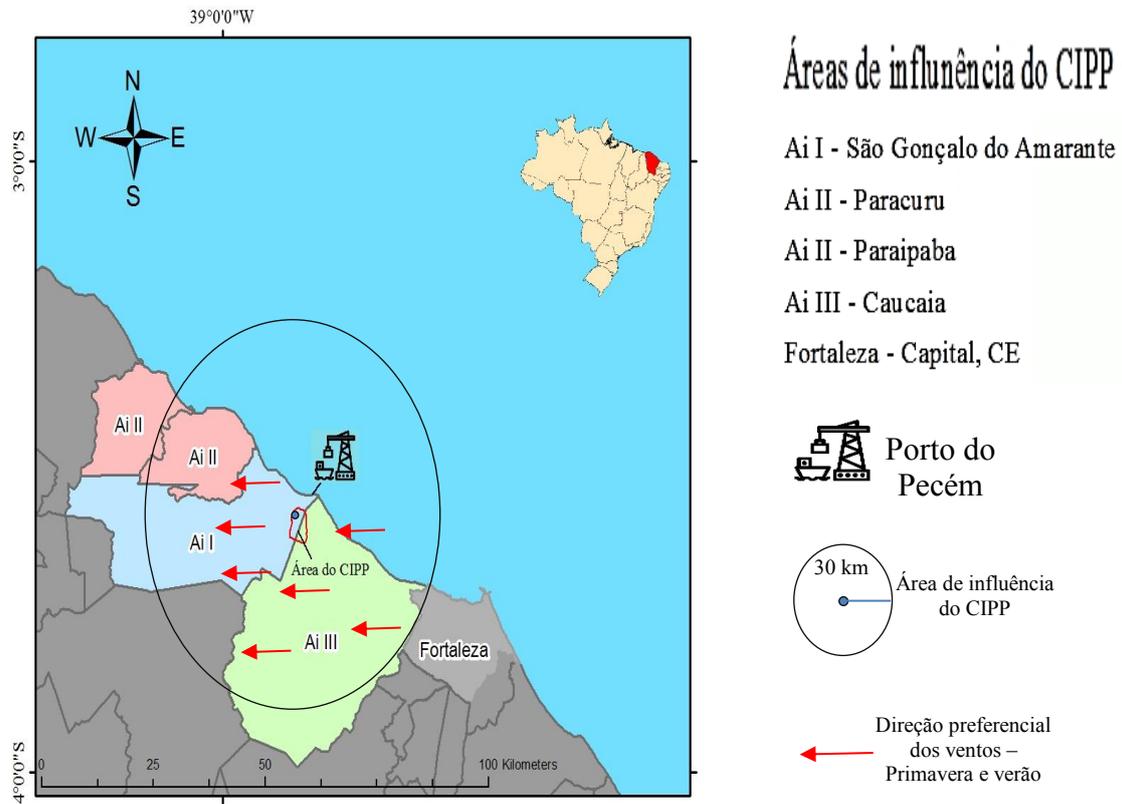
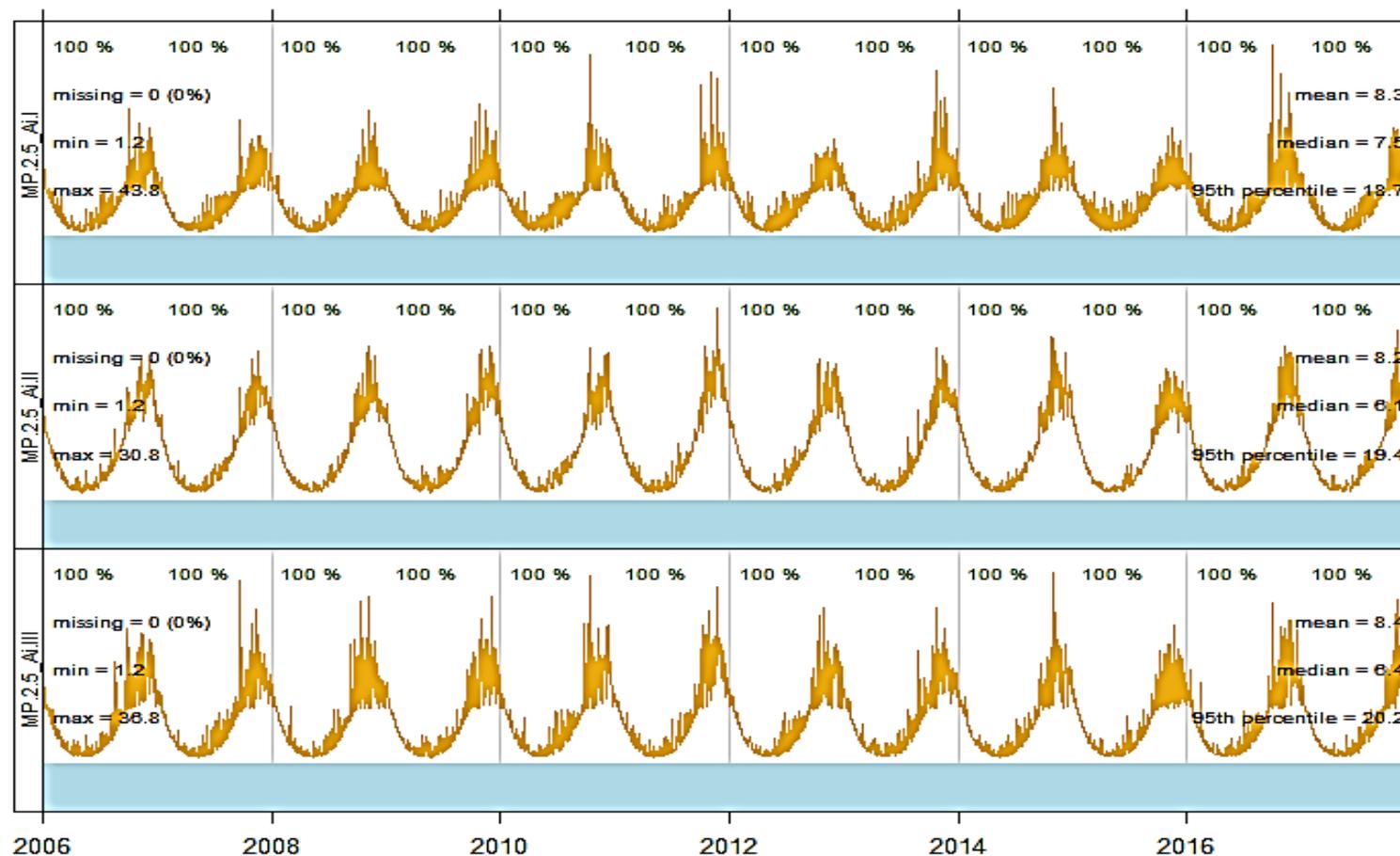


Figura 2: Sumário da distribuição temporal das concentrações diárias estimadas de material particulado fino nos municípios de Paracuru, Paraipaba, São Gonçalo do Amarante e Caucaia. Estado do Ceará, Brasil. Período: 2006 a 2017



Fonte: AOD/ MODIS - Geospatial Interactive Online Visualization and analysis Infrastructure/ NASA. Temperatura média e umidade relativa - Instituto Nacional de Meteorologia.

Nota: Ai I - São Gonçalo do Amarante; Ai II - Paracuru e Paraipaba; Ai III - Caucaia.

Tabela 1: Contagem de óbitos por doenças do aparelho respiratório (DAR), população residente e taxa bruta de mortalidade por 100.000 habitantes. Área de influência I, II, III. Estado do Ceará, Brasil. Período: 2006 a 2010, e 2011 a 2017.

<i>Áreas de Influência</i>		2006-2010	2011-2017	Variação percentual entre períodos
<i>Ai I</i>	População residente	209.726	326.050	55,46 %
	Óbitos - DAR	83	204	145,78 %
	Taxa mortalidade/100.000 hab	40	63	57,50 %
<i>Ai II</i>	População residente	306.673	452.287	47,48 %
	Óbitos - DAR	100	296	196,00 %
	Taxa mortalidade/100.000 hab	33	65	96,97 %
<i>Ai III</i>	População residente	1.617.106	2.435.726	50,62 %
	Óbitos - DAR	679	1333	96,32 %
	Taxa mortalidade/100.000 hab	42	55	30,95 %

Fonte: População residente – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; Óbitos, taxas – Sistema de Informação de Mortalidade /Departamento de informática do SUS.

Nota: Ai I - São Gonçalo do Amarante; Ai II – Paracuru e Paraipaba; Ai III – Caucaia.

Nota: A taxa de óbito foi padronizada pela população de Caucaia de junho de 2011 para permitir a comparação entre as Ais.

Tabela 2: Descritivo do Modelo GAM. Área de influência I, II, III. Estado do Ceará, Brasil. Período: 2006 a 2010.

Parâmetros - 2006-2010	Ai I		Ai II		Ai III	
	β	p-valor	β	p-valor	β	p-valor
Intercepto	-1,426	0,384	-5,795	<0,0001***	-1,363	<0,001**
dias da semana - segunda	0,110	0,785	0,102	0,758	-0,188	0,207
dias da semana - terça	-0,268	0,543	0,238	0,537	0,166	0,224
dias da semana - quarta	-0,003	0,953	0,247	0,518	0,081	0,556
dias da semana - quinta	0,019	0,962	0,246	0,525	-0,253	<0,05*
dias da semana - sexta	0,306	0,423	0,187	0,634	0,012	0,927
dias da semana - sábado	-0,278	0,528	0,208	0,59	-0,042	0,767
Feriados	-1,075	0,286	-1,214	0,228	-0,037	0,859
Umidade relativa	-0,021	0,309	0,034	0,082	0,004	0,519
Termos suavizados (<i>splines</i>)	Estimador	p-valor	Estimador	p-valor	Estimador	p-valor
MP _{2,5}	1,001	0,504	1,353	0,672	2,632	<0,05*
Temperatura média	1,001	0,559	3,706	<0,05*	1,000	0,477

Nota: Ai I - São Gonçalo do Amarante; Ai II - Paracuru e Paraipaba; Ai III - Caucaia.

Nota: dias da semana - domingo (dia 0) categoria de referência.

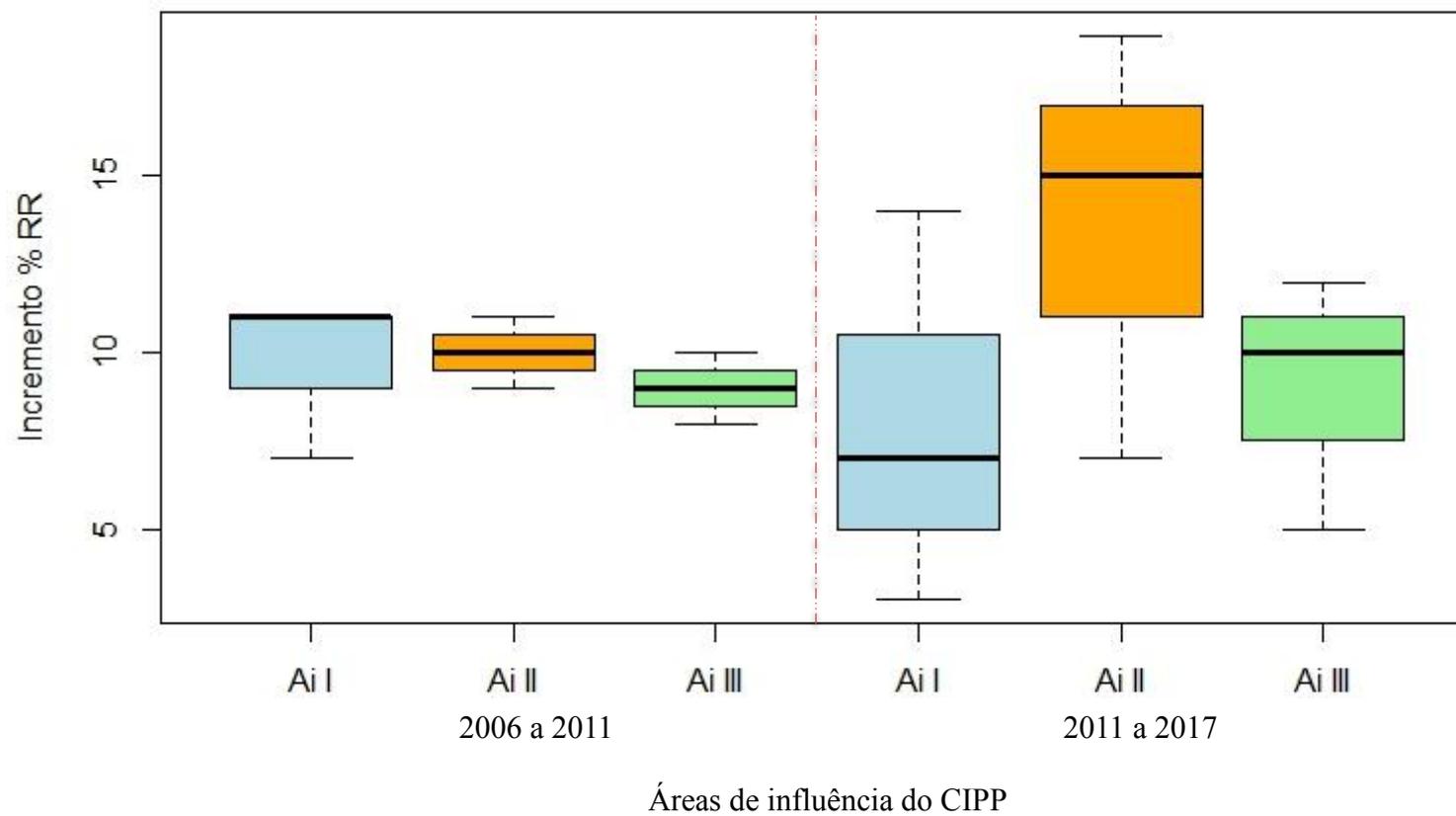
Tabela 3: Descritivo do Modelo GAM. Área de influência I, II, III. Estado do Ceará, Brasil. Período: 2011 a 2017.

Parâmetros - 2011-2017	Ai I		Ai II		Ai III	
	β	p-valor	β	p-valor	β	p-valor
Intercepto	-4,680	<0,0001***	-1,74	<0,05*	-1,62	<0,0001***
dias da semana - segunda	-0,214	0,465	0,475	<0,05*	-0,102	0,329
dias da semana - terça	0,241	0,356	0,221	0,342	-0,069	0,503
dias da semana - quarta	0,478	<0,05*	0,288	0,21	0,036	0,717
dias da semana - quinta	0,105	0,695	0,087	0,718	0,081	0,418
dias da semana - sexta	0,238	0,362	0,311	0,173	-0,081	0,437
dias da semana - sábado	-0,213	0,466	0,292	0,204	0,12	0,226
Feriados	0,14	0,682	0,074	0,81	0,014	0,919
Umidade relativa	0,025	<0,05*	-0,009	0,445	0,012	<0,001**
Termos suavizados (<i>splines</i>)	Estimador	p-valor	Estimador	p-valor	Estimador	p-valor
MP _{2,5}	1,000	<0,001**	1,978	<0,001**	2,77	<0,001**
Temperatura média	1,002	0,065	1,018	0,901	1,000	0,233

Nota: Ai I - São Gonçalo do Amarante; Ai II – Paracuru e Paraipaba; Ai III – Caucaia.

Nota: dias da semana - domingo (dia 0) categoria de referência.

Figura 3: Boxplot da variação percentual do risco relativo de óbito por DAR associado ao incremento de 10 $\mu\text{g m}^{-3}$ de MP_{2,5}. Área de influência I, II, III, Estado do Ceará, Brasil. Período: de 2006 a 2010 e 2011 a 2017.



Nota: Ai I - São Gonçalo do Amarante; Ai II - Paracuru e Paraipaba; Ai III - Caucaia.

Tabela 4: Resumo da variação percentual do risco relativo de óbito por DAR associado ao incremento de $10 \mu\text{g m}^{-3}$ de $\text{MP}_{2,5}$. Área de influência I, II, III. Estado do Ceará, Brasil. Períodos de 2006 a 2010 e 2011 a 2017.

Área de influência do CIPP

		2006-2010		2011-2017	
		$1 \mu\text{g m}^{-3}$	$15 \mu\text{g m}^{-3}$	$1 \mu\text{g m}^{-3}$	$15 \mu\text{g m}^{-3}$
Ai I		11 % (8 %-16 %)	11 % (6 %-13 %)	14 % (11 %-17 %)	7 % (6 %-9 %)
Ai II	Varição percentual do Risco Relativo	11 % (8 %-16 %)	9 % (7 %-13 %)	15 % (11 %-19 %)	7 % (6 %-11 %)
Ai III		10 % (8 %-13 %)	8 % (7 %-10 %)	12 % (10 %-14 %)	10 % (9 %-11 %)

Nota: As colunas representam valores de referência a partir dos quais, ocorrendo o incremento de $10 \mu\text{g m}^{-3}$ de $\text{MP}_{2,5}$ haveria a variação do RR descrita.

Nota: Ai I - São Gonçalo do Amarante; Ai II – Paracuru e Paraipaba; Ai III – Caucaia.

REFERÊNCIAS

BELL, M. L. Assessment of the Health Impacts of Particulate Matter Characteristics. Research Report 161. Health Effects Institute, Boston, MA, n.161, p. 70, 2012. Disponível em: <<https://www.healtheffects.org/system/files/Bell-161.pdf>>. Acesso em: nov. 2018.

CASTRO, H. A.; GOUVEIA, N.; ESCAMILLA-CEJUDO, J. A. Questões metodológicas para a investigação dos efeitos da poluição do ar na saúde. **Rev Bras Epidemiol**. São Paulo, v. 6, n. 2, p. 135-149, 2003.

CEARÁ. ASSEMBLEIA LEGISLATIVA. **Cenário atual do complexo industrial e portuário do Pecém**. Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará; Eudoro Walter de Santana (Coordenador). Fortaleza, INESP, 2013, 323p. Disponível em:<https://www.al.ce.gov.br/phocadownload/conselhoaltosestudos/Cenario_Porto_do_Pecem_.pdf> Acesso em: 13 out 2017.

CHU, Y.; LIU, Y.; LI, X.; LIU, Z.; LU, H.; LU, Y.; XIANG, H. A Review on Predicting Ground PM_{2,5} Concentration Using Satellite Aerosol Optical Depth. **Atmosphere**, v.7, n.10, p.25, 2016.

CROUSE, D. L.; PETERS, P. A.; VAN DONKELAAR, A.; GOLDBERG, M. S.; VILLENEUVE, P. J.; BRION, O.; BURNETT, R. T. Risk of Nonaccidental and Cardiovascular Mortality in Relation to Long-term Exposure to Low Concentrations of Fine Particulate Matter: A Canadian National-Level Cohort Study. **Environmental Health Perspectives**, v.120, n.5, p.708–714, 2012.

COHEN, A, J.; et al. Estimates and 25-years trend of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from global Burden of Diseases Study. **The Lancet**. v. 389, n.10082, 2017, p.1907-1918, 2015.

CONCEIÇÃO, G. M. DE S.; SALDIVA, P. H. N.; SINGER, J. DA M. (2001). Modelos MLG e MAG para análise da associação entre poluição atmosférica e marcadores de morbimortalidade: uma introdução baseada em dados da cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v.4, n.3, p.206–219, 2001.

GONÇALVES, S. K. Cardiovascular diseases and the exposure to particulate air pollutants derived from forest fires in Porto Velho municipality, Rondonia state, Brazilian Amazon rain forest region. Tese (Doutorado em Saúde Pública) - Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca. Rio de Janeiro, p.79. 2016.

HEALTH EFFECTS INSTITUTE^a. State of Air 2018. Special Report. Boston, MA: Health Effects Institute, p. 22. 2018. Disponível em: <<https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/soga-2018-report.pdf>>.

HEALTH EFFECTS INSTITUTE^b. Interactive data explorer. 2018. Disponível em: <<https://www.stateofglobalair.org/data/#/health/plot>>.

FENG, S.; GAO, D.; LIAO, ZHOU, F.; WANG, X. The health effects of ambient MP_{2,5} and potential mechanisms. **Ecotoxicology and Environmental safety**. v. 128, p. 67-74, 2016.

FRUMKIN, H. Environmental health in the regional scale. In *Environmental health: from global to local*. 3ed. São Francisco CA, Jossey-Bass. 2016. cap. 13, p. 466-498.

GANEM, R. S. Políticas setoriais e meio ambiente. Brasília. Câmara dos Deputados, p. 374, 2015. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/a-camara/documentos-e-pesquisa/estudos-e-notas-tecnicas/livros-eletronicos/politicas-setoriais-e-meio-ambiente>> Acesso em: 20 OUT 2017.

NASCIMENTO A, P. et al. Associação entre a concentração de partículas finas na atmosfera com doenças respiratórias agudas em crianças. **Rev. Saúde. Pública.**,v.51, n.3, 2017.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). Evidências disponíveis para atualizações futuras dos guias de qualidade do ar global. 48p, 2015. Disponível em: <<http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2016/who-expert-consultation-available-evidence-for-the-future-update-of-the-who-global-air-quality-guidelines-aqgs-2016>> acesso em: 23/11/2018.

PINHEIRO. J. O complexo portuário do Pecém na produção industrial e no turismo de negócios do Ceará. Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Estadual do Ceará, Centro de Estudos Sociais Aplicados. Ceará-CE. 111p, 2018.

RAVEN, P, H.; BERG, L, R.; HASSENZAHN, D, M. Poluição do Ar. In: *Ambiente*. 7. ed. Estados Unidos da América: John Wiley e Sons, Inc, 2010. cap. 20. p 446 – 468.

SHI, L. et al. Low-Concentration MP2,5 and Mortality: Estimating Acute and Chronic Effects in a Population-Based Study. *Environmental Health Perspectives*, v.124, n.1, p.46-52, 2016.

VEDANTHAM, R.; LANDIS, M. S.; OLSON, D.; PANCRAS, J. P. Source Identification of PM_{2.5} in Steubenville, Ohio Using a Hybrid Method for Highly Time-Resolved Data. **Environmental Science & Technology**, v.48, n.3, p.1718–1726, 2014.

ZHU, Y.; HUANG, L.; LI, J.; YING, Q.; ZHANG, H.; LIU, X.; HU, J. Sources of particulate matter in China: Insights from source apportionment studies published in 1987–2017. **Environment International**, v.115, p.343–357, 2018.

CONCLUSÃO

Esta pesquisa permitiu entender que o material particulado nas áreas sob a influência do CIPP se comportam de maneira sazonal, com maiores concentrações na primavera e verão. Neste mesmo período há também uma direção preferencial dos ventos que sugere um movimento predominante destas partículas do sentido leste para oeste. Desta maneira, a Ai II seria uma região que recebe as partículas vindas das demais áreas de estudo que são as mais industrializadas.

O período de 2011 a 17 foi o mais significativo em relação aos efeitos à saúde da população local. A Ai II apresentou uma maior taxa de óbitos por DAR, uma maior amplitude na variação percentual e foi a área que apresentou o maior incremento do risco relativo de óbito por DAR partir de baixas concentrações, mesmo estando na área com os menores picos de concentração estimadas de $MP_{2,5}$ e reduzido número de fontes industriais de $MP_{2,5}$.

Apesar de estarem dentro dos padrões nacionais de qualidade do ar, a saúde da população ainda é impactada, de maneira que a caracterização dos componentes do $MP_{2,5}$ nas diferentes Ais seria um próximo passo importante.

REFERÊNCIAS

AUSTRALIAN CONSERVATION FOUNDATION (ACF). Australia's most polluted postcode. ACF, AU. 24p. 2018. Disponível em <https://www.acf.org.au/stronger_air_pollution_standards_needed_to_protect_poorer_australians> Acesso: jan. 2019.

ALMEIDA, L T. **Política Ambiental: uma análise econômica**. ed. 1, São Paulo: Editora Unesp. Campinas, p. 192, 1998.

ALVES, H. P. DA F. (2013). Análise da vulnerabilidade socioambiental em Cubatão-SP por meio da integração de dados sociodemográficos e ambientais em escala intraurbana. *Revista Brasileira de Estudos de População*, 30(2), 349–366.doi:10.1590/s0102-30982013000200002

AMÂNCIO, C, T; NASCIMENTO, L. C. Asma e poluentes ambientais: um estudo de séries temporais. **Revista da Associação Médica Brasileira. Brasil**, v. 58, n. 3, p. 302-307, 2012.

ANDRADE FILHO, V. S. Estudo da associação entre material particulado emitido em queimadas e doenças respiratórias no município de Manaus, AM. 2011. 86p. Dissertação (Mestrado em Clima e Meio Ambiente) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Universidade do Estado do Amazonas, 2011.

BARBIERI, J. C. *Gestão ambiental empresarial: Conceitos, modelos e instrumentos*. 3. ed. atual e ampliada. São Paulo: Editora Saraiva, 358p, 2011

BEZERRA, M. G. V. **Do canto das nambus ao barulho do trem: transformações no modo de vida e na saúde na comunidade de Bolso no Complexo Industrial e Portuário do Pecém-CE**. Ceará, 2010. 218p. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2010.

BRANDÃO, C.A. Dinâmicas e transformações territoriais recentes: o papel da PNDR e das políticas públicas não regionais com impacto territorial. IPEIA texto para discussão 2460. Brasília, 2019. 47p. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/9090/1/TD_2460.pdf>.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil (1988)**. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico. 292p, 1988.

_____. **Ministério do Meio Ambiente**. Política Nacional de Meio Ambiente. Brasília, DF: Senado Federal. p.27, 1981.

_____. **Ministério do Meio Ambiente**. Diretrizes básicas para o zoneamento industrial nas áreas críticas de poluição, e outras providências, DF: Senado Federal. 1980.

_____. **Resolução CONAMA nº491, de 19 de novembro de 2018. Padrões de Qualidade do Ar. Publicado no D.O.U. de 21/11/2018, Seção I, p. 155.**

_____. Ministério da Saúde. **Caderno de atenção básica: Doenças respiratórias crônicas, n 25**. Brasília – DF, n. 25, 2010. Disponível em: <

http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/doencas_respiratorias_cronicas.pdf> acesso: 20/09/2017.

CASTRO, C. **Correia do Pecém está vazando e será vedada. Diário Nordeste. Economia. Fortaleza, 2011.** Disponível em: <<http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/cadernos/negocios/correia-do-Pecém-esta-vazando-e-sera-vedada-1.654948>> Acesso em: 17 nov 2017.

CAVALCANTE, L. R. **Políticas de Desenvolvimento Regional no Brasil: uma estimativa de custo.** Brasília: Núcleo de estudos e pesquisa da consultoria legislativa/CONLEG/Senado. 2014, 31p, (série – textos para discussão nº154). Disponível em:< www.senado.leg.br/estudos>.

CAVALCANTE, L. R. Produção teórica em economia regional: uma proposta de sistematização. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, v. 02, p. 9-32, 2008.

CAVALCANTE, L. R.; UDERMAN, S. Regional development policies, 2003-2006. In: LOVE, J. L.; BAER, W. **Brazil under Lula: economy, politics, and society under the worker-president.** New York: Palgrave Macmillan, 2009. Cap. 14. p. 263–281.

CEARÁ. Assembleia Legislativa. **Cenário atual do complexo industrial e portuário do Pecém.** Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará; Eudoro Walter de Santana (Coordenador). Fortaleza: INESP, 2013 323p. Disponível em: <<https://www.al.ce.gov.br/phocadownload/cenarioatualPecém.pdf>> Acesso em: 13 out 2017.

CEARÁ. Assembleia Legislativa. **Iniciando o diálogo.** Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará, Fortaleza, 2009 77p. Disponível em: <https://www.al.ce.gov.br/index.php/pacto-pelo-Pecém/iniciando-o-dialogo> Acesso em: 13 out 2017.

CÉSAR, A. C. G., NASCIMENTO, L. F. C., MANTOVANI, K. C. C., & POMPEO VIEIRA, L. C. (2016). Material particulado fino estimado por modelo matemático e internações por pneumonia e asma em crianças. *Revista Paulista de Pediatria*, 34(1), 18–23. doi:10.1016/j.rpped.2015.06.009.

CETESB (São Paulo). Qualidade do ar no Estado de São Paulo: 2017. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Maria Lúcia Gonçalves Guardani (coordenação geral) São Paulo: CETESB, 2018. 198p.

COSTA, C. **Mais de 3 décadas após ‘Vale da Morte’, Cubatão volta a lutar contra alta na poluição.** BBC Brasil São Paulo, 2017, p 12. Disponível em: <<http://www.bbc.com/portuguese/brasil-39204054>> Acesso em: 23 nov 2017.

CHU, H., XIN, J., YUAN, Q., ZHANG, X., PAN, W., ZENG, X., WANG, M. (2018). Evaluation of vulnerable PM_{2,5}-exposure individuals: a repeated-measure study in an elderly population. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(12), 11833–11840. doi:10.1007/s11356-018-1412-9

Diário do Nordeste. **Ibama multa Energia Pecém em 15,5 mi.** Diário do Nordeste. Economia, Fortaleza, 2013. Disponível em: <<http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/cadernos/negocios/ibama-multa-energia-Pecém-em-r-15-5-mi-1.347587>> Acesso em: 23 nov 2017.

DIEHL, F. P. **Políticas públicas e legislação ambiental brasileira (1972 -1992): um histórico.** Santa Catarina, 1994. Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis- SC. 130p. 1994.

DING, P.-H., WANG, G.-S., GUO, Y.-L., CHANG, S.-C., & WAN, G.-H. (2017). Urban air pollution and meteorological factors affect emergency department visits of elderly patients with chronic obstructive pulmonary disease in Taiwan. *Environmental Pollution*, 224, 751–758. doi:10.1016/j.envpol.2016.12.035.

DONKELAAR, A. V; et al. Global Estimates of Ambient Fine Particulate Matter Concentrations from Satellite-Based Aerosol Optical Depth: DeveloMPent and Application. **Environ Health Perspective**, v. 118, n. 6, p. 847-855, 2010.

DUNEA, D., IORDACHE, S., & POHOATA, A. (2016). Fine Particulate Matter in Urban Environments: A Trigger of Respiratory Symptoms in Sensitive Children. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(12), 1246. doi:10.3390/ijerph13121246.

EPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América. Epidemiologia dos efeitos a saúde humana associados ao material particulado. In: **Crítérios de qualidade do ar para material particulado**. v. 2/2. rev. 4. USA: EPA, 2004. p. 529 - 1026

EPA. **Informativo material particulado e sua saúde.** Washington, D.C, 2016. Disponível em:<<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P1001EX6.txt>> Acesso em: 23 nov 2017.

FENGER, J. (2009). Air pollution in the last 50 years – From local to global. *Atmospheric Environment*, 43(1), 13–22. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.061.

FRUMKIN, H. Environmental health in the regional scale. in **Environmental health: from global to local**. 3ed. São Francisco CA, Jossey-Bass. 2016. cap. 13, p. 466-498.

GAVINIER, S; NASCIMENTO, C.F.L. Poluentes atmosféricos e interações por acidente vascular encefálico. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v.9, n.3, p. 390-4001, 2014.

GANEM, R. S. **Políticas setoriais e meio ambiente.** Brasília. Câmara dos Deputados, p. 374, 2015. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/a-camara/documentos-e-pesquisa/estudos-e-notas-tecnicas/livros-eletronicos/politicas-setoriais-e-meio-ambiente>> Acesso em: 20 OUT 2017.

GAO, N., LI, C., JI, J., YANG, Y., WANG, S., TIAN, X., & XU, K.-F. (2019). Short-term effects of ambient air pollution on chronic obstructive pulmonary disease admissions in Beijing, China (2013–2017). *International Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease*, Volume 14, 297–309. doi:10.2147/copd.s188900.

GE, E., LAI, K., XIAO, X., LUO, M., FANG, Z., ZENG, Y., ZHONG, N. (2018). Differential effects of size-specific particulate matter on emergency department visits for respiratory and cardiovascular diseases in Guangzhou, China. *Environmental Pollution*. doi:10.1016/j.envpol.2018.08.068.

GINA – Global Initiative for Asthma. Pocket guide for health professional. 2017. 28p. Disponível em: < <http://ginasthma.org/gina-reports/>> acesso em: dez. 2017.

GOLD – Global Initiative for Chronic Obstrutive Lung Disease. Global strategy for the diagnosis managent, and prevention of chronic obstructive pulmonaty disease: report 2018. 141p. Disponível em: < <http://goldcopd.org/gold-reports/>> acesso em: jan 2018.

GONÇALVES, S. K. Cardiovascular diseases and the exposure to particulate air pollutants derived from forest fires in Porto Velho municipality, Rondonia state, Brazilian Amazon rain forest region. Tese (Doutorado em Saúde Pública) - Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca. Rio de Janeiro, p.79. 2016.

GOULART, F, A. Doenças crônicas não transmissíveis: estratégias de controle e desafios para os sistemas de saúde. Brasília Ministério da saúde. p. 95, 2011. Disponível em:< <https://www.nescon.medicina.ufmg.br/biblioteca/registro/referencia/0000004600>> acesso em: 23/02/2018.

GREENBERG, N., CAREL, R. S., DERAZNE, E., BIBI, H., SHPRIZ, M., TZUR, D., & PORTNOV, B. A. (2016). Different effects of long-term exposures to SO₂ and NO₂ air pollutants on asthma severity in young adults. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 79(8), 342–351. doi:10.1080/15287394.2016.1153548

HEALTH EFFECTS INSTITUTE (HEI). Interactive data explorer. 2018. Disponível em: < <https://www.stateofglobalair.org/data/#/health/plot> >.

HERTEL, O.; GOODSITE, M. Urban Air Pollution Climates throughout the World. In: Issues in environmental science and technology 28: Air quality in urban environments. R. E. HESTER.; R. M. HARRISSON (editors). UK: RSCPublishing. 2009. cap. 1. p. 1-22.

HOU, W., XU, X., LEI, Y., CAO, J., ZHANG, Y., CHEN, L., & HUO, X. (2016). *The role of the PM_{2,5}-associated metals in pathogenesis of child Mycoplasma Pneumoniae infections: a systematic review. Environmental Science and Pollution Research*, 23(11), 10604–10614. doi:10.1007/s11356-016-6535-2.

HUANG, H.-C., Lin, F. C.-F., Wu, M.-F., Nfor, O. N., Hsu, S.-Y., Lung, C.-C., Liaw, Y.-P. (2019). Association between chronic obstructive pulmonary disease and PM_{2,5} in Taiwanese nonsmokers. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. doi:10.1016/j.ijheh.2019.03.009.

IBAMA. IBAMA multa ceará portos em r\$ 13,8 milhões por lançamento de carvão mineral na praia do Pecém. Notícias 2017 IBAMA, Brasília. 2017. Disponível em:< <http://www.ibama.gov.br/noticias/422-2017/1066-ibama-multa-cearaportos-em-13-8-milhoes-por-lancamento-de-carvao-mineral-na-praia-do-Pecém>> Acesso em: 25 nov 2017.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. 1º Diagnóstico da rede de

monitoramento da qualidade do ar no Brasil. Brasília –DF. 2014. Disponível em: <http://www.forumclima.pr.gov.br/arquivos/File/Rosana/Diagnostico_Qualidade_do_Ar_Versao_Final_Std.pdf> acesso em: 22 out. 2017

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Desenvolvimento Regional Brasil: políticas, estratégias e perspectivas. Organização, Aristides Monteiro Neto, César Nunes de Castro, Carlos Antônio Brandão. Rio de Janeiro. 2017. cap 1. p. 37-64.

JACOBSON, M, Z^a. Efeitos da meteorologia na poluição do ar. In: Poluição atmosférica: história, ciência e regulamentação. USA: Cambridge University Press, 2002. cap. 6. p. 145 – 178. cap 1 p. 1 - 22

JACOBSON, M, Z^b. Partículas de aerossol no SMOG e no ambiente global. In: Poluição atmosférica: história, ciência e regulamentação. USA: Cambridge University Press, 2002. cap. 5. p. 115 – 144.

KOREN, H.; BISESI, M. Gerenciamento da qualidade do ar. In: Hand book of Environmental health: pollutant interaction in air, water, and soil. v. 2. ed. 4. Lewis Publishers, 2003. cap. 1. p. 1 – 84.

KUMAR N, CHU A, F. A. An empirical relationship between PM_{2,5} and aerosol optical depth in Delhi Metropolitan. **Atmos Environ**, v. 41, n.21, p.4492–4503, 2007.

KUMAR N, Chu A. F. A. Remote sensing of ambient particles in Delhi and its environs: estimation and validation. **Int J Remote Sensing**, v.29 n.12, p. 3383–3405, 2008.

LAGO, A. A. C. Estocolmo, Rio, Joanesburgo o Brasil e as três conferências ambientais das nações unidas. Brasília, Ed. Fundação Alexandre Gusmão. Cap. 4, p. 115 – 144. 2007.

LI, J; et al. Major air pollutants and risk of COPD exacerbations: a systematic review and meta-analysis. **International journal of COPD**, v. 11, p. 3079-3091, 2016.

LIRA, C; et al. Sistemas de Informação Geográficas: Análise de dados de satélite. Lisboa: Direção Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos, cap. 2, p. 36-54, 2016. Disponível em:<www.sophia-mar.pt>

MALTA, D. C. et al. Mortalidade por doenças crônicas não transmissíveis no Brasil e suas regiões, 2000 – 2011. **Epidemiologia e serviços de saúde. Brasil**, v. 23, n. 4, p. 599-608, 2014.

MARIANO, J. B. **Impactos Ambientais do Refino de Petróleo**. 2001. 279p. Dissertação Mestrado, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2001.

MAYNARD, R. L. Health effects of urban pollution. In: Issues in environmental science and technology 28: Air quality in urban environments. R. E. HESTER.; R. M. HARRISSON (editors). UK: RSCPublishing. 2009. cap. 6. p. 109-124.

Ministério do Meio Ambiente (MMA). Compromisso pela qualidade do ar e saúde ambiental. Brasília, DF. 2009. p. 20.

MONASTERIO, L. M. **O que é um problema regional? Uma nota preliminar.** Boletim regional, urbano e ambiental, Brasília, n.3, p.13, 2009. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/240/_arquivos/boletim_ipea_uc__desenvolvimento_de_z_09_240.pdf> Acesso em: 15 set 2017.

MORAES, A. C. L. et al. Sibilância em crianças e adolescentes vizinhos a uma indústria petroquímica no Rio Grande do Norte, Brasil. **Jornal de Pediatria**, v.86, n.4, p.337-44, 2010.

NASCIMENTO, L. F. C.; FRANCISCO, J.B. Material particulado e internação hospitalar por hipertensão arterial em uma cidade brasileira de porte médio. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v.29, n.8, p.1565-71, 2013.

OMS – Organização Mundial da Saúde. Avaliação de risco. In: Diretrizes sobre a qualidade do ar: material particulado, ozônio, dióxido de nitrogênio e dióxido de enxofre. Atualização global. 2005. part. 2. cap. 10-13 p. 217- 422.

OMS – Organização Mundial da Saúde. Carga da doença pelos efeitos conjuntos da poluição do ar doméstico e ambiental para 2012. Resumo dos resultados. v. 2, 4p, 2012. Disponível em:<[Zttp://www.who.int/airpollution/data/AP_jointeffect_BoD_results_Nov2016.pdf?ua=1](http://www.who.int/airpollution/data/AP_jointeffect_BoD_results_Nov2016.pdf?ua=1)> acesso em: 23/11/2017.

PAIVA. W. L. **Dez anos de história (1997-2007) a evolução do emprego industrial na economia cearense parte I.** Brasília, DF. 2010. 45p. (Série Textos para Discussão do Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE)).

PEREIRA JUNIOR. J. S. Legislação Brasileira sobre poluição do ar. Biblioteca digital da Câmara dos deputados. Brasília, DF. 2007. 11p.

PINHEIRO. J. O complexo portuário do Pecém na produção industrial e no turismo de negócios do Ceará. Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Estadual do Ceará, Centro de Estudos Sociais Aplicados. 2018, Ceará-CE. 111p.

PONTES. A. P. **A política de atração de investimentos industriais do ceará: Uma análise do período 1995-2005.** Brasília, DF. 2006. 22p. (Série Textos para Discussão do Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará IPECE).

POPE, C, A; Epidemiology of Fine Particulate Air Pollution and Human Health: Biologic Mechanisms and Who's at Risk? **Environmental Health Perspective**. USA, v. 108, p. 713-723, 2000.

RAVEN, P, H.; BERG, L, R.; HASSENZ AHL, D, M^a. Ecossistemas e o ambiente físico, atmosfera. In: Ambiente. 7. ed. Estados Unidos da América: John Wiley e Sons, Inc., 2010. cap. 5. P 89 – 116.

RAVEN, P, H.; BERG, L, R.; HASSENZ AHL, D, M^b. Poluição do Ar. In: Ambiente. 7. ed. Estados Unidos da América: John Wiley e Sons, Inc, 2010. cap. 20. p 446 – 468.

RIGOTTO, R. M. Inserção da saúde nos estudos de impacto ambiental: o caso de uma

termelétrica a carvão mineral no Ceará. **Ciência e Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v.14, n. 6, p. 2049-2059, 2009.

RIGOTTO, R. M. **O “progresso” chegou. E agora? As tramas da (in)sustentabilidade e a sustentação simbólica do desenvolvimento.** 2004. Tese (Doutorado em Sociologia) – Centro de Humanidades, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

COCHERO, C; SACCO, P; ZARATIN, L. Assessment of human exposure to air pollution. **Encyclopedia of Environmental Health.** Elsevier. p. 230-237. 2011.

SILVA FILHO, L. A. Distribuição Espacial da Indústria no Ceará: Fases e Fatos no Contexto dos anos 2000. **Revista Economia e Tecnologia.** V.10, n. 2, p. 107-130, 2014.

SILVA FILHO, L. A.; QUEIROZ, S. N. Políticas de concentração ou desconcentração industrial no território cearense? **Revista de Administração Pública e Gestão Social - APGS, Viçosa**, v1. n. 4, pp. 1-22, dez. 2009.

TADANO, S.Y. Análise do impacto de MP₁₀ na saúde populacional: estudo de caso em Araucária, PR. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 122p, 2007.

TYLER MILLER, G.; SPOOLMAN, S, E^a. geologia e fontes minerais não renováveis. In: *Living in the Environment*. 17. ed. USA: Brooks/Cole CENGAGE LearningTM, 2012. cap. 14. p 346 – 370.

TYLER MILLER, G.; SPOOLMAN, S, E^b. Energias não renováveis. In: *Living in the Environment*. 17. ed. USA: Brooks/Cole CENGAGE LearningTM, 2012. cap. 15. p 370 – 398.

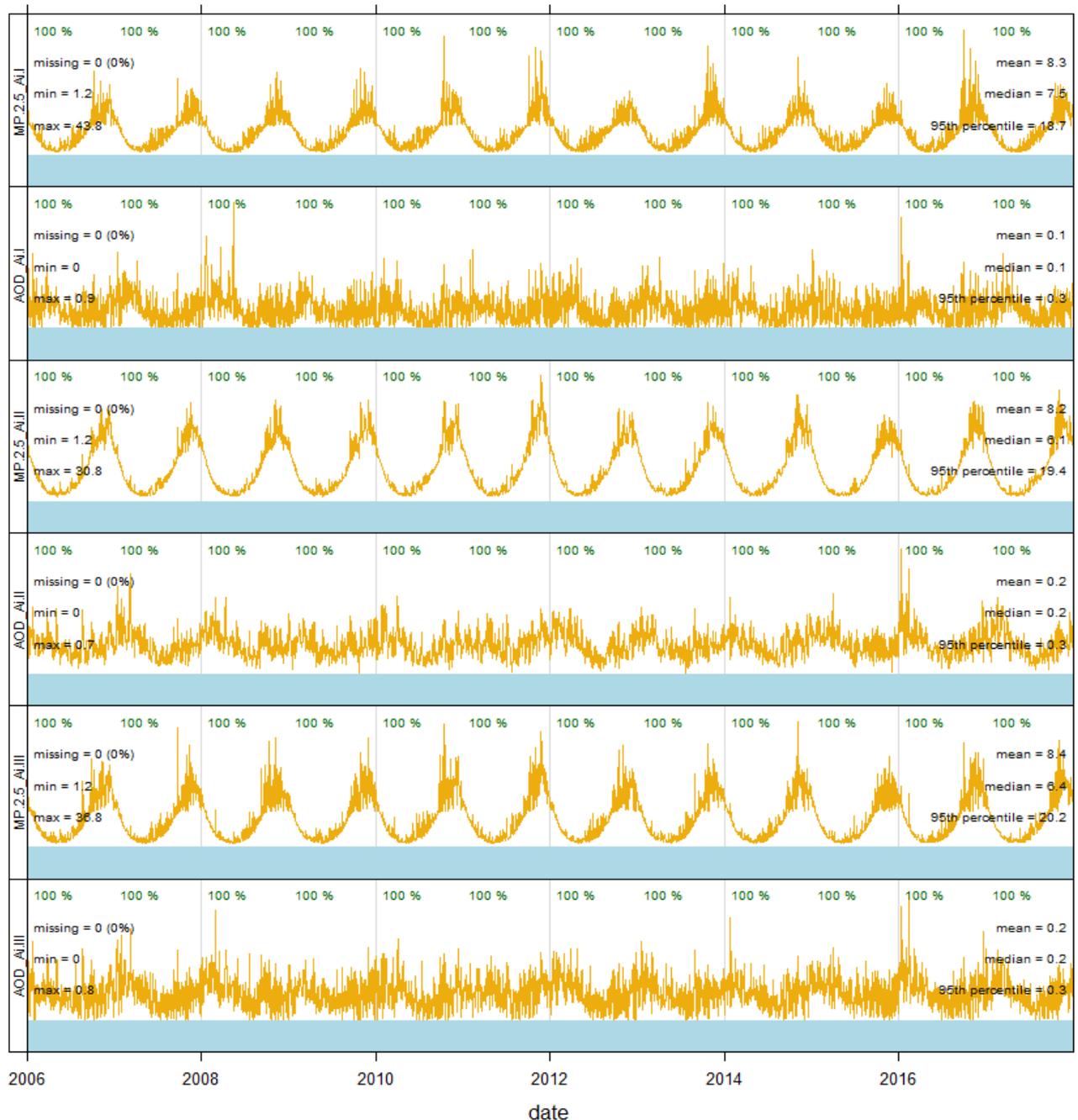
TYLER MILLER, G.; SPOOLMAN, S, E^c. Poluição do ar. In: *Living in the Environment*. 17. ed. USA: Brooks/Cole CENGAGE LearningTM, 2012. cap. 18. p 468 – 489.

VASCONCELOS, J. R.; ALMEIDA, M. B.; SILVA, A. B. **Ceará: Economia, Finanças Públicas e Investimentos nos anos de 1986 a 1996.** Brasília-DF, 1999. 45p. (Série Textos para Discussão do Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará IPECE).

ZHENG, X., DING, H., JIANG, L., CHEN, S., ZHENG, J., QIU, M., GUAN, W. (2015). Association between Air Pollutants and Asthma Emergency Room Visits and Hospital Admissions in Time Series Studies: A Systematic Review and Meta-Analysis. *PLOS ONE*, 10(9), e0138146.doi:10.1371/journal.pone.0138146.

Apêndice A

Sumário da distribuição temporal das concentrações diárias estimadas de material particulado fino e seus respectivos dados de AOD nos municípios de Paracuru, Paraipaba, São Gonçalo do Amarante Caucaia. Estado do Ceará, Brasil. Período: 2006 a 2017.



Fonte: AOD/ MODIS - Geospatial Interactive Online Visualization and analysis Infrastructure/ NASA. Temperatura média e umidade relativa - Instituto Nacional de Meteorologia. Elaboração: O autor

Nota: Ai I - São Gonçalo do Amarante; Ai II – Paracuru e Paraipaba; Ai III – Caucaia.