

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Setor de Tecnologia
Departamento de Engenharia Ambiental

ERIKA FELTRIN

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR DE CURITIBA E REGIÃO
METROPOLITANA EM DIFERENTES PADRÕES TEMPORAIS

Trabalho de conclusão de curso II apresentado ao curso de Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Ambiental.

Orientador: Nelson Luís Dias

Curitiba, 2016



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

ERIKA FELTRIN

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR DE CURITIBA E REGIÃO METROPOLITANA EM DIFERENTES PADRÕES TEMPORAIS

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 9,5 pela seguinte banca examinadora:

Orientador: NLDias
Nelson Luís Dias
Departamento de Engenharia Ambiental/UFPR

Membro 1: [Assinatura]
Eduardo Felga Gobbi
Departamento de Engenharia Ambiental/UFPR

Membro 2: [Assinatura]
Ricardo Carvalho de Almeida
Departamento de Engenharia Ambiental/UFPR

Curitiba, 05 de Junho de 2016

Sumário

Sumário	ii
Lista de Tabelas	iv
Lista de Figuras	vi
1 Introdução	1
2 Revisão bibliográfica	3
2.1 Qualificação do problema a ser abordado	3
2.2 Principais poluentes na atmosfera	4
2.2.1 Monóxido de carbono	4
2.2.2 Óxidos de nitrogênio	5
2.2.3 Dióxido de enxofre	5
2.2.4 Material particulado	5
2.2.5 Ozônio	6
2.3 Efeitos específicos do ozônio na saúde	7
2.4 Legislações sobre qualidade do ar	8
2.4.1 Legislação Brasileira	8
2.4.2 Legislação Americana	10
2.4.3 Legislação Europeia	10
2.4.4 Organização Mundial da Saúde (OMS)	11
3 Metodologia	14
3.1 Caracterização da região de estudo	14
3.2 Rede de monitoramento	14
3.3 Unidades de concentração de gases atmosféricos	16
3.4 Preenchimento de dados faltantes	17
3.5 Cálculo das médias móveis	20
3.6 Cálculo dos limites de concentração do ozônio	21

3.6.1	Legislação Brasileira	21
3.6.2	Legislação Americana	21
3.6.3	Legislação Europeia	22
3.6.4	Organização Mundial da Saúde	22
3.7	Análises Gerais	22
4	Resultados e Discussões	24
5	Conclusões e Recomendações	36
A	Figuras dos resultados	38
	Referências Bibliográficas	51

Lista de Tabelas

2.1	Porcentagem de aumento nos casos de internações em Cubatão.	7
2.2	Padrões de Qualidade do Ar no Brasil e no Paraná (Resoluções CONAMA 003/90 e SEMA 016/14)	9
2.3	Níveis de Qualidade do Ar no Brasil e Paraná (Resoluções CONAMA 003/90 e SEMA 016/14)	10
2.4	Padrões de Qualidade do Ar nos Estados Unidos	11
2.5	Padrões de Qualidade da União Europeia	12
2.6	Níveis de Qualidade do Ar indicados pela Organização Mundial da Saúde	12
2.7	Padrões de concentração de Ozônio conforme o estabelecido pelas legislações brasileiras, americanas, europeias e da OMS	13
3.1	Médias horárias em (ppb) de cada mês do ano de 2015 na estação Ouvidor Pardiniho	19
3.2	Quatro valores máximos de concentração de ozônio para os anos de 2003 a 2008 e a média móvel ao longo de três anos	22
4.1	Porcentagens de dados válidos de ozônio para cada estação de monitoramento (2003 - 2007)	24
4.2	Porcentagens de dados válidos de ozônio para cada estação de monitoramento (2008 - 2011)	25
4.3	Porcentagens de dados válidos de ozônio para a estação localizada na Praça Ouvidor Pardiniho para o período de (2012 - 2015)	25
4.4	Padrões de qualidade do ar (Ozônio) convertidos para partes por bilhão (ppb)	26
4.5	Porcentagens de dados válidos na série original, na série preenchida e a porcentagem de dados preenchimentos em cada ano	27
4.6	Violações do padrão brasileiro de $[O_3]$ na Ouvidor Pardiniho no período de estudo (2003-2015)	30
4.7	Número de violações do padrão de $[O_3]$ na estação Ouvidor Pardiniho de acordo a OMS	31

4.8	Número de extrapolações do padrão de [O ₃] na estação Ouvidor Pardini de acordo a legislação europeia	31
4.9	Valores máximos das médias de 8 horas das concentrações de ozônio para cada ano e a média das quatro maiores concentrações ao longo de 3 anos	32
4.10	Violações aos padrões americanos (EUA) e europeus (EUR) durante os anos de 2003 a 2010	32
4.11	Violações aos padrões americanos (EUA) e europeus (EUR) durante os anos de 2009 a 2015	33
4.12	Violações aos padrões brasileiros (BR) e da Organização Mundial da Saúde (OMS) durante os anos de 2003 a 2009	33
4.13	Violações aos padrões brasileiros (BR) e da Organização Mundial da Saúde (OMS) durante os anos de 2010 a 2015	33

Lista de Figuras

3.1	Localização das estações fornecidas de monitoramento da Qualidade do Ar	15
4.1	Histograma da distribuição de probabilidade de horas consecutivas de falhas na medição de ozônio	27
4.2	Gráfico da análise da confiabilidade do método de preenchimento de dados	28
4.3	(a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardino no ano de 2003.	28
4.4	(a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardino no ano de 2010.	29
4.5	(a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardino no ano de 2015.	29
4.6	Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardino no ano de 2003	30
4.7	Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardino no ano de 2010	30
4.8	Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardino no ano de 2015	31
4.9	Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio no período estudado na estação Ouvidor Pardino	34
4.10	Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio em cada estação do ano na estação Ouvidor Pardino	34
A.1	(a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardino no ano de 2004.	38
A.2	(a)Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardino no ano de 2005.	38
A.3	(a) Concentrações e (a) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardino no ano de 2006.	39

A.4	(a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2007.	39
A.5	(a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2008.	39
A.6	(a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2009.	40
A.7	(a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2011.	40
A.8	(a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2012.	40
A.9	(a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2013.	41
A.10	(a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2014.	41
A.11	Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2004	41
A.12	Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2005	42
A.13	Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2007	42
A.14	Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2008	43
A.15	Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2009	43
A.16	Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2011	44
A.17	Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2012	44
A.18	Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2013	45
A.19	Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2014	45
A.20	Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardiniho no Verão	46
A.21	Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardiniho no Outono	46
A.22	Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardiniho no Inverno	47

A.23	Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardino no Primavera	47
A.24	Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardino nos anos de (a) 2003 e (b) 2004	48
A.25	Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardino nos anos de (a) 2005 e (b) 2006	48
A.26	Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardino nos anos de (a) 2007 e (b) 2008	48
A.27	Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardino nos anos de (a) 2009 e (b) 2010	49
A.28	Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardino nos anos de (a) 2011 e (b) 2012	49
A.29	Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardino nos anos de (a) 2013 e (b) 2014	49
A.30	Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardino nos anos de 2015	50

Capítulo 1

Introdução

Com a substituição da manufatura pela maquinofatura em meados do século XIX, durante a Revolução Industrial, houve uma introdução de processos que geram emissões de poluentes na atmosfera, causando um crescente problema de poluição atmosférica em países industrializados (Vianna *et al.*, 2008).

Acompanhando o crescimento econômico dos países as emissões antrópicas de gases e partículas na atmosfera tendem a aumentar devido, por exemplo, ao aumento da frota de carros e de emissões de fonte industriais (Santana *et al.*, 2012). Problemas no meio ambiente e na saúde humana começam a serem notados em diversos locais do mundo resultantes desse aumento. Exemplos de efeitos adversos que o corpo humano pode apresentar se exposto a concentrações elevadas desses poluentes são, por exemplo, doenças respiratórias e cardiovasculares. Ao longo dos anos, as emissões de poluentes aumentaram consideravelmente e ao redor do mundo houve gradativamente a criação de legislações para delimitar níveis aceitáveis de tais poluentes na atmosfera assegurando o bem estar do ser humano e a preservação do ambiente.

Há diversos poluentes que representam uma ameaça à saúde humana e ao meio ambiente. Este estudo, porém, terá foco no ozônio. O ozônio troposférico é encontrado naturalmente na troposfera em baixas concentrações. Com a influência do ser humano o processo de consumo e formação do ozônio foi desequilibrado havendo mais produção do que o consumo. O problema é que em altas concentrações o ozônio pode ser tóxico para o ser humano e o ecossistema. No ser humano, as vias aéreas são fortemente afetadas pelo poluente devido ao seu alto potencial oxidante e citotóxico (Cançado *et al.*, 2006).

Existem diversas legislações vigentes em diversos países estabelecendo padrões diferentes da qualidade do ar. Este trabalho tem como objetivo fazer uma avaliação da qualidade do ar de Curitiba e Região Metropolitana, sob a ótica do ozônio, do ponto de vista desses diferentes padrões existentes vigentes.

No próximo capítulo são descritos os problemas gerados pela poluição atmosférica, e é feita uma breve descrição de quais são os principais poluentes que representam risco

para saúde humana e também quais são as legislações que serão usadas para realizar as comparações da qualidade do ar na Região Metropolitana de Curitiba. No capítulo 3, há uma descrição da área avaliada, da rede de monitoramento da qualidade do ar existente e das metodologias que serão aplicadas no projeto. O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões das análises efetuadas nesse trabalho. No capítulo 5 é apresentado uma breve conclusão do trabalho e também recomendações sobre futuros trabalhos que possam ser executados para completar as análises aqui efetuadas.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1 Qualificação do problema a ser abordado

A poluição atmosférica é considerada como o maior risco de saúde ambiental do mundo (Garcia-Menendez *et al.*, 2015). A geração de energia através da queima de combustíveis fósseis, que se iniciou no século XIX, devido ao início da Revolução Industrial, foi um dos propulsores da poluição atmosférica pois resultou no aumento da liberação de material particulado e dióxido de enxofre na atmosfera (Vianna *et al.*, 2008). Segundo Gouveia *et al.* (2003), no século seguinte, efeitos do aumento das concentrações de substâncias nocivas ao humano já começaram a ser presenciados no mundo.

Um dos primeiros eventos graves de poluição atmosférica registrados foi o que ocorreu no mês de Dezembro de 1930 na região do Vale do rio Meuse, na Bélgica, na época considerada uma das regiões mais industrializadas da Europa. Um episódio de inversão térmica resultou na formação de uma névoa sobre o vale, que resultou na morte de 60 pessoas devido a alterações no trato respiratório (Nemery *et al.*, 2001). Outro evento de extrema poluição atmosférica aconteceu 22 anos depois em Londres, Inglaterra. A cidade vivenciou um denso nevoeiro que cobriu a cidade durante 5 dias. De acordo com o governo britânico, esse episódio resultou em cerca de 3000 mortes a mais do que as 3 primeiras semanas do mesmo mês do ano anterior (Bell e Davis, 2001).

Castro *et al.* (2013) citam que os principais responsáveis pela emissão de poluentes são os veículos automotores e os processos industriais. Nas últimas décadas houve um aumento das fontes de poluição ao redor do mundo. Vianna *et al.* (2008) destacam que o Brasil, por ser um país com alto crescimento demográfico acaba tendo essas emissões agravadas. Há também o fato de que o país possui extensas áreas de produção agrícola que devido a queima de biomassa, pode ser considerada uma fonte de poluição atmosférica. Ao longo do último século, as concentrações de poluentes tem aumentado gradativamente, o que pode influenciar tanto o clima quanto pode afetar a saúde humana (Lazaridis, 2011).

Como a matriz energética dos Estados Unidos é predominantemente térmica, a queima de combustíveis no país é alta e comparando com o Brasil bem mais elevada. Um exemplo do quanto pode ser forte o impacto dessas fontes em países onde a queima de combustíveis é elevada é a queda de energia elétrica que aconteceu nos Estados Unidos e em parte do Canadá em 2003. Um estudo mostra que com o desligamento das usinas operadas com a queima de combustíveis fósseis devido à falta de energia elétrica, houve uma redução considerável na concentração de poluentes em uma área afetada na Pensilvânia quando comparado com o dia anterior ao episódio e com áreas que não foram afetadas pelo episódio. As concentrações de (SO_2) e de (O_3) foram reduzidas em cerca de 90% e 50%, respectivamente (Marufu, 2004).

As condições meteorológicas da troposfera influenciam diretamente a qualidade do ar. Um exemplo comum dessa influência é a chuva. Regiões com maior índice pluviométrico podem apresentar uma qualidade de ar melhor, pois a chuva ajuda na precipitação dos poluentes. Outros fatores que podem alterar as concentrações de poluentes na atmosfera são: ventos, topografia, uso do solo, temperatura e umidade do ar (Codato, 2008; von Glasow *et al.*, 2012).

2.2 Principais poluentes na atmosfera

A resolução do CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA), nº003 de 28 de Junho de 1990 define como poluente atmosférico qualquer forma de matéria ou energia que pode apresentar alguma característica em desacordo a níveis pré-estabelecidos, pode ser prejudicial a segurança, materiais, fauna, flora ou à saúde. Os poluentes são divididos entre duas categorias: primários e secundários. Os poluentes primários são aqueles que são emitidos diretamente na atmosfera; já os secundários são as substâncias formadas a partir de poluentes primários. Em outras palavras, poluentes secundários não são emitidos diretamente no ar (Baird e Cann, 2011).

Andrews *et al.* (2003) destacam que existem diversos poluentes que são considerados de grande importância na atmosfera, tais como: o monóxido de carbono (CO), os dióxidos de nitrogênio (NO_x), o dióxido de enxofre (SO_2), o ozônio (O_3) e o material particulado. Ozônio e o dióxido de nitrogênio são os principais responsáveis pela formação do *smog* fotoquímico e são frequentemente estudados devido ao seu potencial de causar problemas respiratórios.

Nas próximas seções serão explicados as principais fontes desses poluentes assim como possíveis efeitos que os mesmos podem causar à saúde humana.

2.2.1 Monóxido de carbono

É um poluente primário e conforme citado por Hill (1997), o monóxido de carbono (CO) é um gás proveniente da combustão incompleta de qualquer componente que

contenha carbono e que pode ser tóxico até mesmo em pequenas concentrações.

O efeito do CO no ser humano quando encontrado em concentrações elevadas é no sistema respiratório (Kunzli *et al.*, 2010). Quando encontrado em concentrações não tão elevadas o efeito do CO é no sistema circulatório, onde moléculas de CO se juntam com a hemoglobina na corrente sanguínea impedindo que o oxigênio realize essa tarefa, ocasionando a falta de oxigênio no coração (Kunzli *et al.*, 2010; Andrews *et al.*, 2003).

2.2.2 Óxidos de nitrogênio

O grupo óxidos de nitrogênio é composto por duas espécies moleculares: o monóxido de nitrogênio (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO₂). As duas fontes responsáveis por grandes emissões de NO_x na atmosfera são a combustão de combustíveis fósseis e a queima de biomassa. Esse grupo que compreende os NO_x é um dos principais precursores na formação de ozônio troposférico (Seinfeld e Pandis, 2006).

Baird e Cann (2011) observam que um dos principais motivos pelos quais o grupo dos óxidos de nitrogênio é considerado perigoso à saúde é o seu alto potencial oxidante: o NO₂ pode afetar o sistema respiratório e também é solúvel em tecidos biológicos. Conforme Castro *et al.* (2013) não há conhecimento do exato impacto que as concentrações frequentemente encontradas na atmosfera de monóxido de nitrogênio (NO) podem causar na saúde. Porém o maior risco apresentado por esse composto é que ele quando oxidado forma o dióxido de nitrogênio (NO₂).

2.2.3 Dióxido de enxofre

As principais fontes de emissão de dióxido de enxofre (SO₂) na atmosfera são tanto processos naturais (oxidação de matéria orgânica no solo, oxidação de ácido sulfídrico sobre os oceanos, erupções vulcânicas e queima de biomassa) quanto atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis (Eisinger e Burrows, 1998; Hill, 1997).

Hill (1997) menciona que o dióxido de enxofre é extremamente reativo e pode causar irritações nos olhos, pulmões e em outras membranas mucosas e pode agravar situações em que o indivíduo já apresenta algum tipo de doença respiratória ou cardíaca.

2.2.4 Material particulado

O material particulado é definido como partículas estáveis em forma líquida, sólida ou uma mistura sólido-líquida que possam conter apenas um componente químico ou que tenha mais de um componente, por exemplo: sulfatos, nitratos, metais entre outros (Hill, 1997). Os materiais particulados também podem ser denominados como partículas inaláveis.

Seinfeld e Pandis (2006) destacam diversas fontes que emitem materiais particulados, tanto naturais como antropogênicas. As emissões atribuídas a emissão natural

são: ação vulcânica, queima de biomassa, resto de solos e pedras e reações entre gases na atmosfera. As fontes antropogênicas mais significantes são: queima de combustíveis fósseis, processos industriais e meios de transporte com motores ativados por combustão.

Andrews *et al.* (2003) exemplificam a definição dos dois tipos existentes de material particulado, o PM₁₀ e o PM_{2.5}. O PM₁₀ são partículas de até 10 μm em diâmetro, que são capazes de penetrar no sistema respiratório. Há também as chamadas PM_{2.5} que são partículas ainda menores (até 2.5 μm de diâmetro), essas partículas são capazes de penetrar até o pulmão e ficando ali depositadas podendo causar problemas ainda mais sérios.

2.2.5 Ozônio

O ozônio (O₃), diferentemente dos outros poluentes já citados, não é diretamente emitido para a atmosfera. É o resultado de reações químicas entre outros poluentes na atmosfera (Hill, 1997). Dallarosa (2005) cita que os principais componentes precursores na formação de ozônio são: os compostos orgânicos voláteis (COVs), os hidrocarbonetos reativos (RHC), os hidrocarbonetos não-metânicos (NMHC) e os óxidos de nitrogênio (NO_x).

Conforme Baird e Cann (2011), dentre todos os possíveis formadores de ozônio, a principal fonte de formação de ozônio na troposfera é a dissociação fotoquímica do NO₂. A reação dessa formação é dada pelas equações abaixo:



onde hv representa a radiação ultra-violeta da luz solar.

Diversos estudos descrevem os perigos que o ozônio pode causar à saúde. Entre esses eles estão irritações nos olhos, garganta e interferência no funcionamento dos pulmões (Hill, 1997). É importante destacar que o ozônio pode ser encontrado tanto na troposfera quanto na estratosfera. Entretanto é o ozônio troposférico que pode trazer perigo a saúde e ao ambiente, enquanto o ozônio estratosférico é o constituinte da camada de ozônio (Baird e Cann, 2011). Hill (1997) descreve que as principais pessoas suscetíveis a efeitos adversos na saúde devido a exposição de elevadas concentrações de ozônio são: idosos, crianças, asmáticos e pessoas com bronquite.

Tabela 2.1: Porcentagem de aumento nos casos de internações em Cubatão.

	SO ₂	O ₃	PM ₁₀
Doenças respiratórias totais	*	*	4,25%
Doenças respiratórias em crianças de até 5 anos	*	3,91%	5,74%
Doenças cardiovasculares em adultos com mais de 39 anos	3,51%	2,85%	2,29%

* Não houve aumento significativo.

2.3 Efeitos específicos do ozônio na saúde

Nessa seção serão apresentados alguns trabalhos já realizados sobre o efeito que o ozônio e alguns outros poluentes podem causar à saúde.

Um estudo realizado em Cubatão, no estado de São Paulo, analisou através de modelos a porcentagem do aumento de internações na cidade devido a problemas respiratórios. Utilizou-se a hipótese de que ocorreria um acréscimo de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ na concentração dos seguintes poluentes: SO₂, PM₁₀ e O₃. A tabela 2.1 representa estas porcentagens para cada causa de internamento (Nardocci *et al.*, 2013). Nota-se que ocorreria um aumento de quase 3% nas internações de pessoas com mais de 39 anos e aumentariam cerca de 3,91% as internações de crianças com até 5 anos, no caso de aumento na concentração do ozônio.

Um estudo similar realizado na cidade de São Paulo, mostrou que se houvesse um aumento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nas concentrações de PM₁₀ ocorreria um aumento de 4,6% nas internações de crianças de até 5 anos. Já em idosos, esse mesmo aumento representaria 4,3% a mais de hospitalizações em decorrência de doenças pulmonares obstrutivas crônicas (Gouveia *et al.*, 2006). Ainda em São Paulo outro estudo mostrou que, um aumento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ na concentração do CO causaria um aumento de 10,3% na mortalidade em idosos com mais de 65 anos devido a doenças respiratórias. Já um aumento na concentração de SO₂ representaria cerca de 5% no mesmo índice de mortalidade (Gouveia *et al.*, 2003). Nos dois estudos o acréscimo na concentração de ozônio não apresentou muita significância.

Medina-Ramon (2006) realizou um estudo com dados de poluentes de 36 cidades americanas, para o período de 1896 a 1999, e concluiu que um aumento de 5ppb na concentração do ozônio, resultaria num aumento de 0,41% nas admissões hospitalares por pneumonia. Concluiu-se também que haveria um aumento de 0,27% de internações por doenças pulmonares obstrutiva crônica (DPOC).

No sul da Califórnia, EUA, pesquisadores realizaram um estudo em 12 comunidades que eram afetadas por diferentes níveis de concentração de ozônio. Por um período de 5 anos foram acompanhados 3535 estudantes e notou-se que 265 (7,5%) crianças

desenvolveram asma em algum momento durante o período de estudo. Observou-se também que nas regiões em que as concentrações de ozônio eram mais elevadas, crianças que praticavam esportes ou que passavam mais tempo ao ar livre apresentavam mais de 3% de chance de desenvolver asma do que aquelas que não praticaram nenhum esporte ou permaneceram menos tempo no ambiente externo (McConnell *et al.*, 2002).

2.4 Legislações sobre qualidade do ar

2.4.1 Legislação Brasileira

A resolução nº5 de 15 de junho de 1989 do CONAMA (1989) estabelece a criação do Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR). O PRONAR é um instrumento que delimita os níveis de emissão de poluentes atmosféricos visando a proteção da saúde, bem-estar e melhoria da qualidade de vida das populações.

O PRONAR adota duas categorias de padrões de qualidade do ar: os primários e os secundários. Padrões primários são as concentrações que se excedidas podem afetar de algum modo a saúde da população. Padrões secundários são concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê um mínimo efeito adverso sobre o meio ambiente em geral e podem ser entendidos como níveis máximos desejados de concentrações dos poluentes.

Em 1990 é baixada pelo CONAMA a resolução nº3 de 28 de junho de 1990, que complementa a resolução descrita anteriormente. Nela são estabelecidos padrões de qualidade de ar para cada poluente, assim como o método de medição e análise desses poluentes. A resolução também atribui a cada estado a competência de monitoramento da qualidade do ar. Além disso, também é válida para o Estado do Paraná a Resolução nº016, de 15 de Abril de 2014 da Secretária de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA (2014)). A tabela 2.2 representa os padrões estabelecidos conforme as resoluções nacional e estadual.

O CONAMA (1990) e o SEMA também estabelecem os chamados Níveis de Qualidade do Ar, que fazem parte do Plano de Emergência para eventos em que ocorram episódios críticos de poluição do ar. Define-se como episódio crítico um dia em que condições meteorológicas desfavorecem a dispersão dos poluentes na atmosfera causando uma elevada concentração de determinado poluente em um período de 24 horas. Os três níveis de classificação são: Nível de Atenção, Nível de Alerta e Nível de Emergência, as concentrações de cada nível para cada poluente podem ser vistas na tabela 2.3.

Ambas as resoluções estadual e federal definem condições de referências para quando há a necessidade de realizar a mudança das unidades de concentrações avaliadas. Neste caso as duas resoluções estabelecem como condições de referência a pressão de 760

Tabela 2.2: Padrões de Qualidade do Ar no Brasil e no Paraná (Resoluções CONAMA 003/90 e SEMA 016/14)

Poluente	Padrão Primário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Padrão Secundário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tempo de Amostragem	Método de Medição
Partículas totais em suspensão(PTS)	240 ¹ 80	150 60	24 h anual ³	Amostrador de grandes volumes
Partículas Inaláveis(PI)	150 ¹ 50	150 ¹ 50	24 h anual ²	Separador inercial ou Filtração
Fumaça	150 ¹ 60	100 ¹ 40	24 h anual ²	Refletância
Dióxido de Enxofre SO ₂	365 ¹ 80	100 ¹ 40	24 h anual ²	Pararrosanilina
Monóxido de Carbono (CO)	40000 ¹ 10000 ¹	40000 ¹ 10000 ¹	1 h 8 h	Infravermelho não dispersivo
Ozônio (O ₃)	160 ¹	160 ¹	1 h	Quimiluminescência
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	320 100	190 100	1 h anual ²	Quimiluminescência

Notas:

1- não deve ser excedido mais do que uma vez por ano

2- média aritmética

3- média geométrica

Tabela 2.3: Níveis de Qualidade do Ar no Brasil e Paraná (Resoluções CONAMA 003/90 e SEMA 016/14)

Poluente	Nível de Atenção ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Nível de Alerta ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Nível de Emergência ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tempo de Amostragem
Partículas totais em suspensão (PTS)	375	625	875	24 h
Partículas inaláveis (PI)	250	420	500	24 h
Fumaça	250	420	500	24 h
Dióxido de Enxofre (SO_2)	800	1600	2100	24 h
Monóxido de Carbono (CO)	17000	34000	46000	8 h
Ozônio (O_3)	400	800	1000	1 h
Dióxido de Nitrogênio (NO_2)	1130	2260	3000	1 h
Produto entre SO_2 e PTS ¹	65×10^3	261×10^3	393×10^3	24 h

milímetros de coluna de mercúrio (equivalente a 1013,2 milibares) e temperatura de 25°C.

2.4.2 Legislação Americana

A agência regulamentadora do Meio Ambiente dos Estados Unidos é a *Environmental Protection Agency* (EPA, 2015). Em 1990, nos Estados Unidos, foi criado o chamado Lei do Ar Limpo (em inglês, *Clean Air Act*) que estabelece os padrões nacionais da qualidade do ar (*National Ambiente Air Quality Standards (NAAQS)*). O decreto estabelece dois tipos de padrão: o primário e o secundário. As definições dos significados de cada um desses padrões são similares ao estabelecido pela resolução brasileira que foi descrita na seção 2.4.1 deste mesmo capítulo.

A EPA, para atender os termos descritos no *Clean Air Act*, deve revisar os padrões de qualidade do ar a cada cinco anos. Essa medida é para assegurar que os limites reflitam os conhecimentos científicos mais recentes. Nessa revisão são feitas análises focadas na avaliação dos riscos à saúde humana e ao meio ambiente, não incluindo uma avaliação econômica.

A tabela 2.4 representa os padrões de acordo com a regulamentação da EPA.

2.4.3 Legislação Europeia

A Comissão Europeia (EC, 2008) define dois tipos de padrão: valores-limite e valores-alvos. Valores-alvo são valores que na medida do possível devem ser atingidos em um período determinado, não havendo punição em casos que não é atingido o

Tabela 2.4: Padrões de Qualidade do Ar nos Estados Unidos

Poluente	Padrão Primário	Padrão Secundário	Tempo de Amostragem
PM _{2.5}	12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	anual ¹
	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24 h ²
PM ₁₀	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24 h ³
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	75 ppb	-	1 h ⁴
	-	0.5ppm	3 h ⁴
Monóxido de Carbono (CO)	9ppm	-	8 h ⁵
	35 ppm	-	1 h ⁵
Ozônio (O ₃)	0,070 ppm	0,070 ppm	8 h ⁶
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	100 ppb	-	1 h ⁴
	53 ppb	53 ppb	anual ⁷

Notas:

1 - média anual, calculada ao longo de 3 anos

2 - 98^o percentil, calculado ao longo de 3 anos

3 - não deve ser excedido mais do que uma vez por ano, calculado ao longo de 3 anos

4 - 98^o percentil de concentrações máximas horárias, calculado ao longo de 3 anos

5 - não deve ser excedido mais do que uma vez por ano

6 - quarta concentração anual mais alta em 8 horas, calculado ao longo de 3 anos

7 - média anual

valor dentro do prazo estipulado. Já valores-limite são aqueles que podem ser atingidos no período estabelecido e quando atingidos não devem ser excedidos.

A EC considera diversos fatores na forma como os padrões são estabelecidos e aplicados. Por exemplo, são consideradas as realidades sociais, econômicas, políticas e sociais dos países membros. As diretivas da UE não detalham os procedimentos de revisão dos padrões de qualidade do ar, mas reforçam a importância de levar em consideração os estudos científicos sobre os efeitos dos poluentes no ser humano e no ambiente (Santana *et al.*, 2012).

A tabela 2.5 apresenta os padrões de qualidade do ar para a União Europeia.

2.4.4 Organização Mundial da Saúde (OMS)

A Organização Mundial da Saúde (OMS, 2005), criou diretivas de orientação para oferecer apoio à redução dos problemas de saúde decorrentes da poluição do ar. Essas diretivas são válidas para o mundo inteiro. A diferença entre os critérios utilizados para a criação dos padrões de qualidade do ar pela OMS e as agências regulamentadoras de cada país é que cada país leva em consideração as particularidades da sua região a fim de proteger a saúde de seus cidadãos. A OMS somente considera evidências científicas relacionadas com os efeitos adversos desses poluentes. A tabela 2.6 apresenta os níveis de qualidade de qualidade do ar indicados pela OMS.

Tabela 2.5: Padrões de Qualidade da União Europeia

Poluente	Padrão	Tempo de Amostragem	Número Máximos de Violações em 1 ano
PM _{2.5}	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	anual	-
PM ₁₀	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24 h	35
	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	anual	-
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 h	24
	125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24 h	3
Monóxido de Carbono (CO)	10 mg/m^3	média máxima	-
		diária de 8 horas	-
Ozônio (O ₃)	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	média máxima	25 dias, calculado ao longo de 3 anos
		diária de 8 horas	
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 h	18
	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	anual	-

Tabela 2.6: Níveis de Qualidade do Ar indicados pela Organização Mundial da Saúde

Poluente	Nível ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Nível de amostragem
PM _{2.5}	10	anual
	25	24 h
PM ₁₀	20	anual
	50	24 h
O ₃	100	8 h
NO ₂	40	anual
	200	1 h
SO ₂	20	24 h
	500	10 min

A tabela 2.7 apresenta um resumo das concentrações padrões de ozônio sob a perspectiva das diferentes legislações apresentadas nesse capítulo. Serão esses padrões e métodos de avaliações que serão usados como referência nesse trabalho.

Tabela 2.7: Padrões de concentração de Ozônio conforme o estabelecido pelas legislações brasileiras, americanas, europeias e da OMS

	Limite	Intervalo	Método de Análise
Brasil	160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1h	Não exceder mais de uma vez por ano
EUA	0,07 ppm	8h	Média das quatro maiores concentrações anuais ao longo de três anos
EUR	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	8h	Não exceder 25 dias calculado ao longo de três anos
OMS	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	8h	Não exceder mais de uma vez por ano

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Caracterização da região de estudo

A Região Metropolitana de Curitiba (RMC) é composta por 29 municípios do Paraná. Conforme dados do Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social (IPARDES, 2015) a RMC abrange uma área territorial de 16.627,209 km², o que equivale a aproximadamente 8,3% da área total do Estado do Paraná. De acordo com a Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba (COMEC, 2015) a RMC é a segunda maior região metropolitana em extensão do país e concentra aproximadamente 31% da população de todo o estado do Paraná. Segundo o censo demográfico de 2010 a RMC apresentava uma população equivalente a 3.223.836 habitantes. Estima-se que nesses últimos cinco anos tenha ocorrido um aumento de 278.954 habitantes na região.

Baird e Cann (2011) citam que a queima de combustíveis fósseis libera compostos que são precursores à formação do ozônio. De acordo com dados do DETRAN (2014) a frota veicular na RMC apresentou um aumento de 40% entre os anos de 2008 e 2014.

Em questões climatológicas da RMC Danni-Oliveira (2010) ressalta que a região é influenciada durante todo ano pelas massas de ar Tropical Atlântica e Polar Atlântica. No inverno a atuação da massa Polar é dominante, ocasionando um inverno brando com temperaturas podendo chegar a valores negativos. No Verão, ocorre uma variação na dominância das massas de ar e a temperatura pode chegar em torno dos 35°C. Conforme a mesma autora as chuvas são distribuídas ao longo do ano, porém com maiores concentrações no verão e maiores intervalos de tempo chuvosos no inverno.

3.2 Rede de monitoramento

Conforme citado na seção 2.4.1 do capítulo anterior, a competência de monitoramento é dada ao Estado. O Órgão Ambiental responsável pelo monitoramento no Paraná é Instituto Ambiental do Paraná (IAP). Atualmente o IAP possui 12 estações de monitoramento da qualidade do ar na RMC, quatro das quais são automatizadas e localizadas em Curitiba (nos bairros da Cidade Industrial, Boqueirão, Santa Cândida



Figura 3.1: Localização das estações fornecidas de monitoramento da Qualidade do Ar

e na Praça Ouvidor Pardiniho). Em Araucária localizam-se mais quatro estações automáticas. Essas oito estações analisam as concentrações dos seguintes poluentes: O_3 , SO_2 , NO, NO_2 , CO, PTS e PI. As quatro estações restantes são estações manuais que não realizam a amostragem de parâmetros meteorológicos. Dessas, uma localiza-se no município de Colombo, uma em Curitiba e duas em Araucária.

Para a realização deste estudo foram disponibilizados os dados de cinco estações das doze disponíveis: a da Santa Cândida, da Cidade Industrial, da praça Ouvidor Pardiniho, a da REPAR (Araucária) e a próxima da UEG (Araucária). O período de dados disponibilizado foi de 2003 a 2011. A figura 3.1 ilustra a localização destas cinco estações de monitoramento.

Uma das etapas desse projeto é a escolha da estação ideal para ser utilizada como base durante o estudo. Para isso foram calculadas as porcentagens de dados válidos em cada ano para todas as estações e foi feita uma análise de qual estação possui dados mais dados válidos em cada ano do estudo.

3.3 Unidades de concentração de gases atmosféricos

Como visto no capítulo 2.4, cada país ou região possui seus padrões de emissões atmosféricos. Portanto, para o mesmo poluente encontramos diferentes unidades de medição. Nos dados fornecidos pelo IAP, a concentração do ozônio é dada em ppb (partes por bilhão). No entanto a legislação brasileira define um padrão para o ozônio em ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Optou-se portanto, em calcular o equivalente em ppb dos padrões determinados pela União Europeia, CONAMA e OMS, que originalmente são dados em ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Isto garante que todos os dados possam ser avaliados com uma mesma unidade de medida (ppb).

Para realizar essa conversão utiliza-se os métodos e conceitos descritos por Seinfeld e Pandis (2006) e Dias *et al.* (2012). Da equação de gases ideais para os gases atmosféricos, do modelo de volumes parciais e do modelo de pressões parciais, tem-se

$$pV = nRT \quad (3.1)$$

$$pV_x = n_xRT \quad (3.2)$$

$$p_xV = n_xRT \quad (3.3)$$

onde V é o volume do total, V_x é o volume parcial do gás x , p é a pressão total do sistema, p_x é a pressão parcial do gás x , n é o número de moles total, n_x é o número de moles do gás x , R é a constante universal dos gases (no SI, $R = 8,314772\text{Jk}^{-1}\text{mol}^{-1}$) e T é a temperatura termodinâmica.

Definindo uma concentração adimensional (ω_x) que usualmente é indicada em %, partes por milhão (ppm) ou partes por bilhao (ppb) tanto em relação a fração de pressão parcial, quanto em fração de volume parcial, ou ainda em fração molar. Logo obtem-se,

$$\omega_x = \frac{p_x}{p} = \frac{V_x}{V} = \frac{n_x}{n}, \quad (3.4)$$

$$p_x = \omega_x p, \quad (3.5)$$

substituindo 3.5 em 3.2, e lembrando a definição de massa específica de um gás x

$$\rho_x = \frac{m_x}{V_x} \quad (3.6)$$

onde m_x é a massa do gás x e V_x é o volume da substância. Obtem-se

$$\omega_x = \frac{\rho_x RT}{p_x M}. \quad (3.7)$$

Portanto, para realizar a conversão dos padrões brasileiros, europeu e da OMS, que originalmente encontram-se em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para ppb, utilizou-se as equações descritas acima. No caso desse trabalho, ω_x é a concentração convertida em ppb e ρ_x é a concentração em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a ser convertida. A temperatura e pressão de referência que são utilizadas nesses cálculos são dependentes da legislação para qual valor está sendo calculado, e podem ser consultados na seção 2.4.

3.4 Preenchimento de dados faltantes

Um dos fatores principais na formação de ozônio é a existência de luz solar. Durante o dia, por exemplo, a probabilidade de obter uma maior concentração de ozônio é maior incidência de luz solar é mais elevada (Baird e Cann, 2011; Isaksen *et al.*, 2009). Um dos passos iniciais para o preenchimento dos dados faltantes é calcular os intervalos de horas consecutivas de dados faltantes para cada ano da série na estação Ouvidor Pardinho. Somente intervalos com dados faltantes menores de 15 horas consecutivas foram preenchidos.

Dado que o ozônio também é altamente depende de fatores sazonais, para preencher os dados faltantes nas séries de dados optou-se por aplicar um padrão de sazonalidade a série de dados. Esse método aplicado a série foi calculado utilizando a média de determinado horário ao longo de cada dia do mês. A fórmula abaixo representa esse cálculo.

$$M_{m,h}^- = \frac{\sum_{d=1}^{dd} [O_3]_{d,h}}{dd} \quad (3.8)$$

onde h é igual a hora, d é o dia de avaliação, m é o mês e dd é o número total de dias no mês de estudo. A média obtida com a equação 3.8 é usada para substituir o dado faltante daquele horário para qualquer dia do mês calculado.

Aplicando-se a equação 3.8 para a todas as séries de dados obtemos uma série mais completa. A tabela 3.1 é um exemplo dos dados obtidos com a aplicação do método de preenchimento no ano de 2015 da série de concentrações de ozônio. Portanto, conforme a tabela, se hipoteticamente houvesse dados faltantes em qualquer dia de Junho às 2 horas os dados seriam preenchidos pela média calculada de 6,67 ppb.

Em seguida, foi realizado um teste de confiabilidade do preenchimento aplicado a série. Esse teste consiste em analisar se o preenchimento consegue representar e preencher com precisão a série de dados. O teste utilizado consiste em utilizar a série somente com dados válidos, selecionar 5% de dados dessa série (escolheu-se arbitrariamente induzir uma série de dados com 95% de dados válidos), preenchê-los como se

ao invés de dados válidos fossem dados indefinidos e comparar o quanto exato foi o preenchimento em comparação com dado válido medido. Os passos realizados para a escolha desses 5% de dados e o cálculo das médias são os seguintes:

1. Para cada ano, calcular a distribuição de probabilidade de ocorrência de intervalos de dados indefinidos e as médias horárias de cada mês do ano conforme descrito anteriormente;
2. Selecionar aleatoriamente 5% de intervalo de dados da série levando em consideração na escolha os pesos das probabilidades de falhas calculadas no item anterior;
3. Selecionar a média horária do mês de cada dado válido sorteado e comparar com os dados medidos reais da série;
4. Avaliar a acurácia do método acima descrito.

Tabela 3.1: Médias horárias em (ppb) de cada mês do ano de 2015 na estação Ouvidor Pardinho

Hora \ Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0	9,18	9,89	8,57	7,30	6,37	4,61	6,57	9,25	10,31	10,11	10,13	14,29
1	9,77	10,51	9,90	8,39	8,45	5,80	6,97	10,23	11,50	10,68	10,26	15,11
2	9,40	10,37	9,93	8,96	8,63	6,67	7,57	10,38	11,84	10,95	10,08	16,03
3	9,19	9,94	9,80	8,98	9,17	7,39	7,54	10,32	11,69	11,35	10,15	16,10
4	8,28	8,88	8,94	9,06	8,95	7,32	6,94	9,39	11,53	9,92	9,12	14,59
5	5,19	5,37	7,56	7,94	8,05	7,04	6,52	7,84	10,73	8,22	5,91	10,49
6	3,72	3,71	4,78	5,03	5,34	5,32	4,39	4,97	8,06	6,39	4,83	10,29
7	6,04	5,70	4,47	4,19	3,54	3,65	2,73	3,79	7,04	7,12	6,63	14,58
8	10,30	10,18	8,35	6,81	5,09	4,54	3,84	5,43	10,07	10,73	9,32	20,26
9	14,61	16,32	13,61	9,98	8,40	6,69	7,59	9,68	14,71	14,69	12,39	25,37
10	18,40	21,39	18,35	13,46	12,06	8,83	12,43	14,86	19,13	18,85	15,04	27,87
11	20,51	25,03	21,55	16,56	14,34	10,33	15,57	19,71	22,98	21,25	17,90	30,63
12	20,81	26,92	23,87	18,48	16,09	12,03	17,75	22,63	25,69	23,73	19,58	30,85
13	20,30	27,14	24,36	19,85	17,27	13,12	18,56	24,65	27,77	23,65	20,08	29,60
14	18,80	26,71	24,42	18,46	16,04	13,19	18,10	24,13	28,52	22,82	19,99	27,61
15	17,35	25,81	24,33	17,34	14,28	12,42	17,29	23,54	27,88	20,97	18,96	25,43
16	15,89	20,95	20,79	14,06	11,52	9,78	14,79	21,10	24,75	19,20	17,39	22,66
17	13,24	15,84	15,84	9,09	7,27	5,54	8,78	14,16	17,99	14,61	13,65	18,50
18	10,70	11,99	9,68	5,37	3,80	3,26	4,55	7,93	10,49	10,11	10,18	15,44
19	8,29	8,99	7,23	4,64	3,20	2,98	4,28	5,94	8,00	7,89	8,90	13,49
20	7,25	7,79	7,01	5,05	3,85	2,94	4,92	5,96	8,58	7,47	8,46	12,15
21	7,08	6,65	7,18	5,74	3,94	3,38	4,95	6,79	8,60	7,79	8,03	10,78
22	7,76	6,82	6,70	5,70	3,99	3,53	5,25	6,90	9,24	8,07	8,50	10,17
23	8,45	8,27	7,22	6,64	5,03	3,90	6,14	8,30	9,79	8,46	9,53	12,42

3.5 Cálculo das médias móveis

Os padrões de qualidade do ar americanos, europeus e o da OMS definem como método de avaliação o uso da média móvel de 8 horas das concentrações de ozônio. Os dados disponibilizados pelo IAP são horários. Portanto, deve-se aplicar o cálculo de média móvel para a verificação do atendimento ou não dos diversos padrões ambientais aqui avaliados.

Os modelos de média móvel simples podem ser definidos conforme a fórmula abaixo,

$$\bar{c}_i = \frac{\sum_{k=1}^n [O_3]_{i+k-1}}{n} \quad (3.9)$$

onde n é o número de observações (para esse projeto $n = 8$), \bar{c}_i é a média móvel estimada e $[O_3]_i$ são as concentrações de ozônio no período i .

Entretanto a série de dados de qualidade do ar pode apresentar falhas. Nesse caso o guia escrito pela *Environmental Protection Agency (EPA)* detalha exatamente como fazer a manipulação dos dados para o cálculo das médias móveis (EPA, 1998). Uma das primeiras instruções descritas no guia é como calcular a média de 8 horas se houver alguma falha no intervalo calculado. Nesse caso segue-se os seguintes passos:

1. Se somente 6 ou 7 horas de dados estiverem disponíveis no intervalo a ser calculado, a média é calculada utilizando com um divisor (n da fórmula 3.9) de 6 ou 7 horas.
2. Se menos de 6 horas estiverem disponíveis pode-se atribuir a essa média um valor indefinido. Entretanto pode haver casos em que os valores disponíveis são elevados de tal maneira que ao se calcular as médias pode haver valores excedentes ao permitido na lei. Atribuir valores indefinidos pode então ocasionar a omissão dessas violações. Logo, para evitar que casos como esse ocorram a *EPA* aconselha a calcular a média de 8 horas substituindo os valores indisponíveis pela metade do limite mínimo detectável no intervalo de dados e utilizando 8 como denominador para o cálculo da média (n da fórmula 3.9). Se o valor obtido for maior que o limite estabelecido na lei vigente opta-se por manter esse valor na série de dados. Se o valor for menor atribui-se o valor indefinido como média ignorando esse valor calculado.

Por falta de documentação detalhada de como fazer a manipulação dos dados para as legislações e padrões de qualidade do ar europeia e da OMS optou-se por utilizar os mesmos passos descritos acima pela *EPA* para esses padrões.

3.6 Cálculo dos limites de concentração do ozônio

As próximas subseções detalham os procedimentos para obter os valores de concentrações de ozônio de acordo com as regras das legislações avaliadas nesse projeto.

3.6.1 Legislação Brasileira

Conforme descrito na tabela 2.2 o padrão de ozônio de acordo com a legislação brasileira é analisado a partir da série horária de ozônio. Uma violação é definida quando ocorrem mais de uma excedência por ano ao padrão estabelecido. Nesse caso, para analisar a série de dados fornecida pelo IAP devemos comparar se cada valor da série é maior do que o permitido. Se ocorrer mais de um valor por ano que ultrapassem os valores padrões é dito que ocorreram violações da legislação brasileira em relação ao ozônio.

3.6.2 Legislação Americana

O mesmo guia da *EPA* descrito na seção 3.5 detalha como obter os limites de ozônio de qualidade do ar conforme os padrões americanos. Conforme a tabela 2.4 a forma de avaliação dos padrões de ozônio, tanto primários como secundários, é a partir da quarta concentração anual mais alta em 8 horas, calculados ao longo de 3 anos.

Portanto, para avaliar os limites de ozônio de acordo com os padrões americanos deve-se para cada ano obter as quatro maiores concentrações de ozônio e em seguida calcular a média dessas concentrações ao longo de 3 anos consecutivos. A equação a seguir representa o cálculo dessa média móvel ao longo de 3 anos.

$$M_{3\text{anos}} = \frac{\sum_{n=1}^3 [O_{34\text{max}}]}{n} \quad (3.10)$$

onde $M_{3\text{anos}}$ é a média móvel ao longo de três anos, n é o número da posição do ano e $[O_{34\text{max}}]$ é a quarta maior concentração de ozônio no ano.

A tabela 3.2 apresenta um exemplo do cálculo descrito acima para os anos de 2003 a 2008. Os valores em negrito representam os quatro maiores valores de concentração de cada ano. Utilizando como exemplo os anos de 2003, 2004 e 2005 e aplicando a equação 3.10 obtemos o valor da média de ozônio para o período de 2003 a 2005.

$$M_{3\text{anos}} = \frac{55,50 + 44,98 + 45,20}{3} = 48,56\text{ppb} \quad (3.11)$$

a média obtida acima também está representada na tabela 3.2. As médias dos anos seguintes também são calculadas conforme a fórmula anterior. Esse cálculo portanto deve ser aplicado ao período completo da série de dados.

Tabela 3.2: Quatro valores máximos de concentração de ozônio para os anos de 2003 a 2008 e a média móvel ao longo de três anos

Concentrações máximas de 8 horas de ozônio (ppb)					
Ano	1ª maior	2ª maior	3ª maior	4ª maior	média de 3 anos
2003	57,98	57,41	55,92	55,50	
2004	48,05	47,91	46,65	44,98	
2005	50,26	48,52	47,84	45,20	48,56
2006	53,51	52,79	52,23	51,51	47,23
2007	63,89	62,68	61,15	58,91	51,87
2008	45,20	45,12	42,34	40,48	50,30

3.6.3 Legislação Europeia

A tabela 2.5 define que o padrão de ozônio estabelecido pela União Europeia deve ser feito com uma série de tempo de amostragem de 8 horas e avaliando se houve 25 dias de ultrapassagens do limite ao longo de 3 anos. Se ocorreram mais de 25 dias esse foi um período de violação ao estabelecido pelas normas da União Europeia.

A transformação da série horária de concentrações de ozônio para uma série de dados de médias de 8 horas foi feita de acordo com os passos descritos na seção 3.5. Após a geração dessa série conta-se o número de violações ao longo de cada ano e soma-se o número de violações a cada três anos, se ocorreram mais de 25 violações nesse período de três anos dizemos que ocorreu violação nesse período.

3.6.4 Organização Mundial da Saúde

A tabela 2.6 detalha os níveis de qualidade do ar indicados pela OMS. O ozônio nesse caso é calculado a partir de uma série temporal de intervalo de 8 horas. Para obter essa série os mesmos passos aplicados para a transformação da série horária para a série de 8 horas descritos nos casos de avaliação da qualidade do ar de acordo com os padrões americanos e europeus (seções 3.6.3 e 3.6.2, respectivamente) foram aplicados. O método de avaliação é pontual, ou seja, o número de violações será o número de excedências ao valor permitido pela OMS.

3.7 Análises Gerais

Diversas análises foram feitas para analisar o comportamento das concentrações de ozônio em diferentes aspectos. Primeiramente verificou-se as maiores concentrações medidas para checar se há alguma tendência nas concentrações ao longo do tempo. Para isso, seleciona-se as 30 maiores concentrações de ozônio em cada ano da série analisada. O método para a análise escolhida foi através do uso de diagramas de caixa (boxplot). A justificativa para isso é que, conforme descrito por Montgomery e

Runger (2009), esses diagramas que descrevem inúmeras características importantes de um determinado conjunto de dados, tais como, centro, dispersão, desvio de simetria e identificação de *outliers*.

Em seguida verifica-se como as concentrações de ozônio se comportam nas quatro estações do ano. Uma das maneiras de analisar isso é selecionar as maiores concentrações obtidas e realizar a análise com o uso de boxplots. Há diversas maneiras de analisar as concentrações por estação, nesse trabalho escolheu-se analisar das seguintes maneiras:

1. Analisar a série total (2003 a 2015), selecionando os 50 maiores valores de cada estação do ano.
2. Analisar ano a ano as 30 maiores concentrações de ozônio de cada estação do ano.
3. Analisar para cada estação do ano as 30 maiores concentrações ao longo dos anos.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nas análises executadas conforme o capítulo 3. O primeiro passo foi analisar as porcentagens de dados válidos para cada estação. Utilizando os métodos descritos no capítulo 3 foram calculadas as porcentagens de dados válidos em cada ano para todas as estações.

Inicialmente o período inicial de dados obtidos foi dos anos de 2003 a 2011. As tabelas 4.1 e 4.2 apresentam as porcentagens de dados válidos para cada estação da rede de monitoramento da qualidade do ar nesse período. Observa-se que a estação localizada na Praça Ouvidor Pardinho é a que mais possui dados válidos nesse período em relação as demais. Essa estação apresenta menos de 10% de dados faltantes durante 2004 e 2011, o ano de 2003 foi o único ano que apresentou uma porcentagem maior de falhas. Portanto, devido à alta disponibilidade de dados nessa estação optou-se por fazer a análise das concentrações de ozônio nessa estação.

Para ampliar a base de dados foi solicitado ao Instituto Ambiental do Paraná (IAP) os dados mais atualizados de qualidade do ar da estação Ouvidor Pardinho (de 2011 a 2015). As porcentagens de dados válidos na estação para esse período podem ser vistas na tabela 4.3. Os dados das demais estações não constam neste trabalho pois não foram solicitados ao IAP.

Tabela 4.1: Porcentagens de dados válidos de ozônio para cada estação de monitoramento (2003 - 2007)

	2003	2004	2005	2006	2007
Cidade Industrial	*	56,31%	46,19%	19,54%	0,00%
Praça Ouvidor Pardinho	83,23%	99,34%	99,91%	98,97%	99,85%
REPAR	86,68%	91,86%	98,41%	97,93%	94,74%
Santa Cândida	*	32,40%	31,52%	74,01%	89,65%
UEG	53,60%	53,89%	93,13%	93,37%	93,23%

Nota:

* - estação não havia entrado em operação nesse ano

Tabela 4.2: Porcentagens de dados válidos de ozônio para cada estação de monitoramento (2008 - 2011)

	2008	2009	2010	2011
Cidade Industrial	0,00%	0,00%	24,47%	67,67%
Praça Ouvidor Pardinho	99,39%	99,77%	99,81%	95,86%
REPAR	97,35%	99,02%	98,68%	93,96%
Santa Cândida	97,27%	90,81%	99,75%	93,60%
UEG	99,03%	73,62%	85,79%	88,70%

Tabela 4.3: Porcentagens de dados válidos de ozônio para a estação localizada na Praça Ouvidor Pardinho para o período de (2012 - 2015)

2012	2013	2014	2015
99,91%	76,53%	93,16%	93,84%

O período de análise total desse trabalho abrange, portanto, o intervalo dos anos de 2003 a 2015. Conforme podemos ver nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 o ano que obteve mais falhas nas medições das concentrações de ozônio na estação da Praça Ouvidor Pardinho foi o ano 2013 (23,47% de falhas). Em seguida, o segundo ano com maior número de falhas é 2003 (16,77% de falhas). Os demais anos apresentam sempre mais de 90% de dados válidos. Logo, a série completa das concentrações de ozônio (dos 13 anos de dados) apresenta 95,35% de dados válidos na estação Ouvidor Pardinho.

A partir dos padrões de ozônio estabelecidos nas diferentes legislações e normas escolhidas para análise nesse projeto (que podem ser vistos nas tabelas 2.2, 2.4, 2.5 e 2.6) aplicou-se a conversão das unidades de medida dos gases poluentes através dos conceitos descritos na seção 3.3 do capítulo 3 para que os diversos padrões avaliados fiquem com unidades iguais para uma avaliação consistente da série de dados. Os limites de concentração de ozônio convertidos, que agora serão usados como base para o estudo, podem ser vistos na tabela 4.4.

Na tabela 4.4 observa-se os anos em que cada padrão de ozônio entrou em vigência. Nota-se que o padrão brasileiro é o mais antigo, criado há 25 anos atrás. O padrão americano é o mais atual, com a sua última alteração feita em 2015. Isso é um dos maiores debates sobre as diversas legislações vigentes no Brasil, as legislações brasileiras na maioria das vezes das vezes são antigas. Por exemplo, a legislação referente a qualidade do ar não é atualizada com tanta frequência como as normas americanas. A última alteração na legislação de qualidade do ar do Brasil feita pelo CONAMA foi realizada no início da década de 90. Desde então, de ponto de vista científico os conceitos de padrões que possam apresentar perigo a saúde da população podem ter sido alterados. Logo, os padrões vigentes do Brasil podem estar desatualizados.

Tabela 4.4: Padrões de qualidade do ar (Ozônio) convertidos para partes por bilhão (ppb)

	Ano de Vigência	Dado original	Dado convertido (ppb)	Média
Brasil ¹	1990	160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	81,55	1 h
Estados Unidos ¹	2015	0,070 ppm	70,00	8 h
União Europeia ²	2008	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	60,10	8 h
OMS ¹	2005	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	50,97	8 h

Condições de referência:
 1 - T = 25°C p = 1013,2mbar
 2 - T = 20°C p = 1013,2mbar

Outro tópico importante a se discutir é questão sobre as condições de referência impostas por cada padrão pode ser questionada. Todos os padrões utilizam como referência 1 atm. Em regiões onde há uma variação significativa de altitude comparada ao nível do mar, o valor obtido dessa conversão pode ser errôneo.

Conforme a tabela 4.5 após a aplicação dos passos descritos no capítulo 3 na seção 3.4 a série temporal dos 13 anos estudados teve um aumento de 95,35% de dados válidos para 97,61%. O ano com mais dados faltantes (2003) passa a ter 84,28% de dados válidos após o preenchimento.

O histograma 4.1 representa a distribuição de probabilidade de até 15 horas consecutivas de falhas nas medições de ozônio. Na figura observa-se que na série total (dos anos de 2003 a 2015) a probabilidade, havendo falha, ela ser de 1 hora é de 70%, enquanto para 2 horas a probabilidade é de cerca de 15%. A probabilidade de obter mais de 2 horas de falhas é de menos de 10%. A figura 4.2 representa o resultado da aplicação dos passos descritos na seção 3.4 utilizando as probabilidades de acordo com o histograma da figura 4.1. A linha diagonal de escala 1:1 do gráfico representa a reta ideal para um preenchimento com 100% eficácia. Nota-se que o método de preenchimento aplicado não representou com exatidão os dados a serem preenchidos.

O método utilizado nesse trabalho obteve, conforme visto na figura 4.2 um coeficiente de correlação de Pearson (r) de 0,77378. Conforme Jacques (2003), um coeficiente de correlação com módulo entre 0,6 e 0,9 possui uma correlação forte.

O limite de concentração horária de ozônio segundo a resolução do CONAMA é 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ o equivalente a 81,55 ppb que não deve ser excedido mais de uma vez por ano (Tabela 2.2). Foram plotadas, portanto, as séries de concentrações horárias do ozônio dos anos de 2003 até 2015 para observar se ocorreu alguma violação ao que é exigido pelo CONAMA. Os gráficos dos anos de 2003, 2010 e 2015 podem vistos ser nas figuras 4.3, 4.4 e 4.5, respectivamente. As demais séries de concentrações de ozônio para os outros anos da série podem ser encontradas no apêndice A.

Tabela 4.5: Porcentagens de dados válidos na série original, na série preenchida e a porcentagem de dados preenchimentos em cada ano

Ano(s)	Série Original	Série preenchida	% de preenchimento
2003	83,23%	84,66%	1,43%
2004	99,34%	100,00%	0,66%
2005	99,91%	100,00%	0,09%
2006	98,97%	100,00%	1,03%
2007	99,85%	100,00%	0,15%
2008	99,39%	100,00%	0,61%
2009	99,77%	100,00%	0,23%
2010	99,81%	100,00%	0,19%
2011	95,86%	100,00%	4,14%
2012	99,91%	100,00%	0,09%
2013	76,53%	84,29%	7,76%
2014	93,16%	100,00%	6,84%
2015	93,84%	100,00%	6,16%
2003-2015	95,35%	97,61%	2,26%

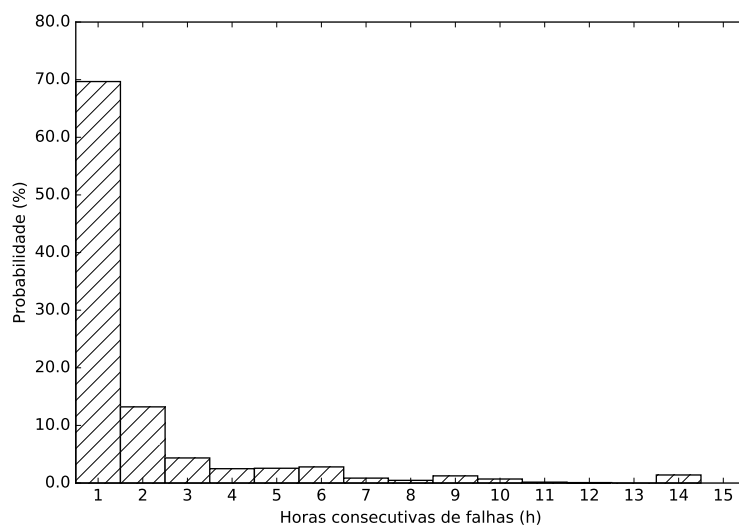


Figura 4.1: Histograma da distribuição de probabilidade de horas consecutivas de falhas na medição de ozônio

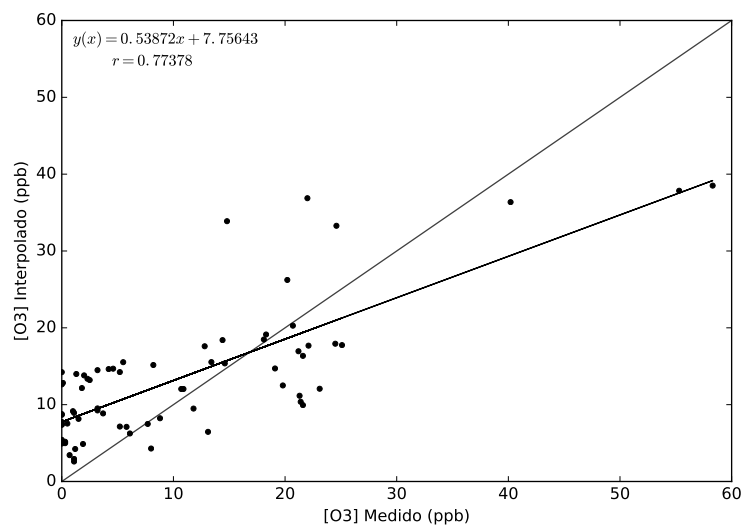


Figura 4.2: Gráfico da análise da confiabilidade do método de preenchimento de dados

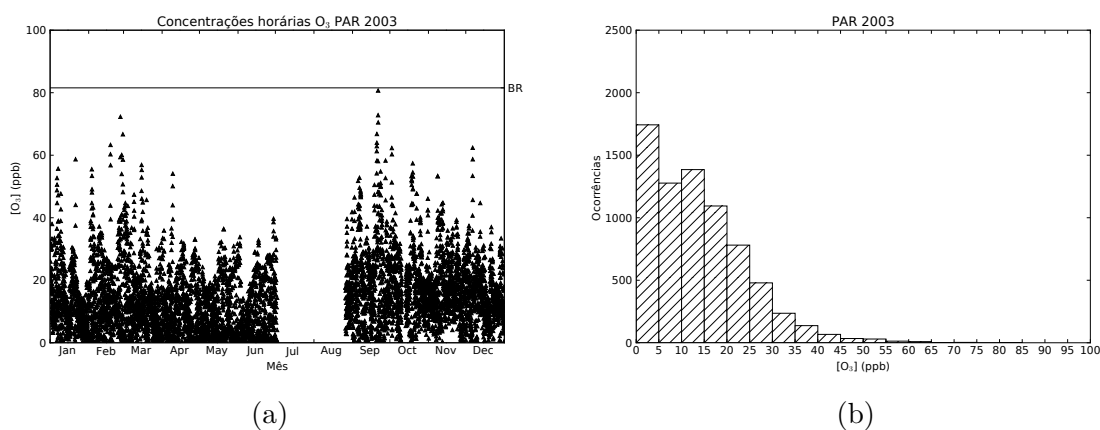


Figura 4.3: (a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardini no ano de 2003.

A tabela 4.6, mostra os anos que ocorrem alguma extrapolação ao limite brasileiro assim como a data, o horário e a concentração do mesmo. É possível notar que em 2007 e 2008 houve extrapolações da concentração de 81,55 ppb, porém ocorreram somente uma vez em cada ano. Já em 2010 ocorreram 4 violações, sendo que duas em horas consecutivas.

As figuras 4.6, 4.7 e 4.8 representam os as médias móveis de 8 horas da série horária de concentração de ozônio para os anos de 2003, 2010 e 2015, respectivamente. Os gráficos das médias dos demais anos de estudo estão no apêndice A. Nesses gráficos há uma reta no limite que a diretiva que a OMS estabelece sobre o limite de ozônio, dado que a análise dos padrões é diretamente de acordo com a concentração de ozônio em 8 horas. Entretanto são com essas mesmas séries de 8 horas que as violações de ozônio

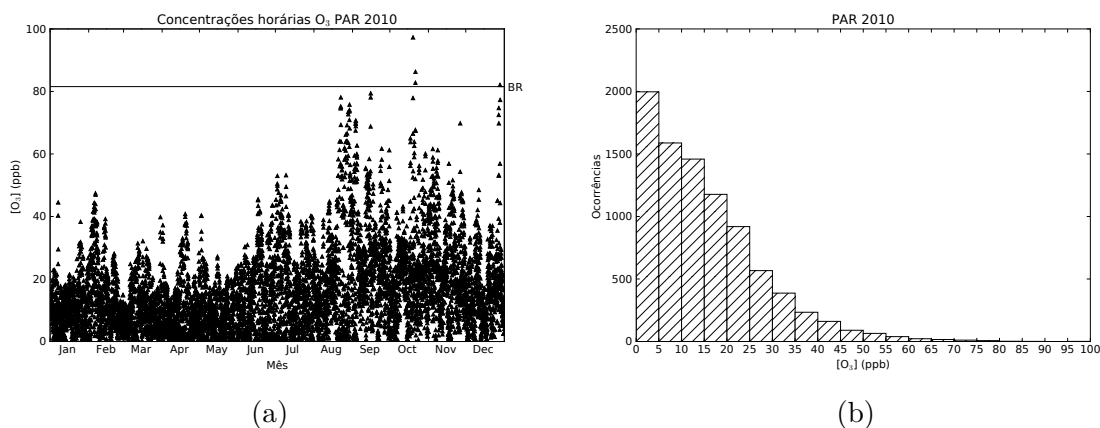


Figura 4.4: (a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2010.

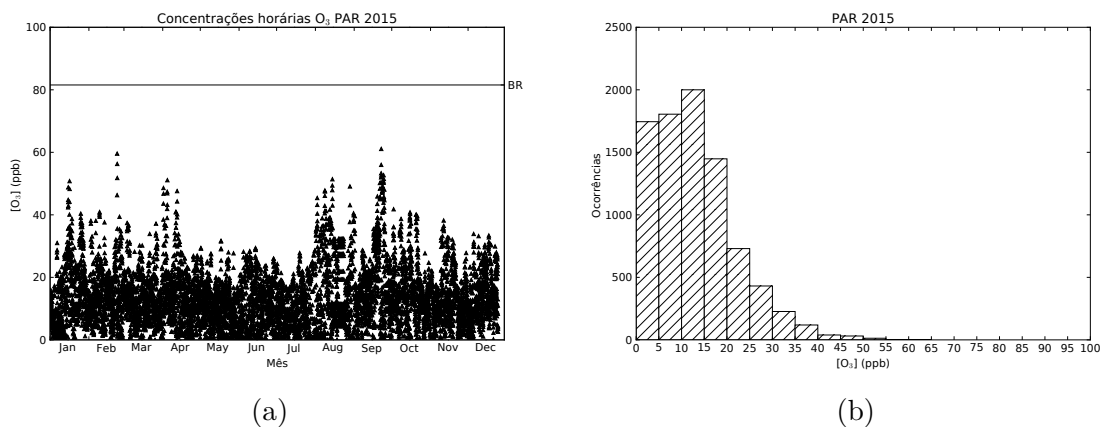


Figura 4.5: (a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2015.

são avaliadas na perspectiva da legislação europeia e americana.

A tabela 4.7 representa o número de violações ocorridas em cada ano de acordo com as diretrizes da OMS. Nota-se que o ano que mais obteve violações foi o ano de 2010, com um total de 52 violações no ano. Em 2007 e 2014 ocorreram 23 e 25 violações, respectivamente. Os anos de 2003 e 2006 apresentaram menos de 10 violações em cada ano. Já nos demais anos não ocorreram extrapolações ao estabelecido pela OMS.

A tabela 4.8 representa o número de violações ao limite de concentração de 8 horas de ozônio de acordo com o estabelecido na legislação europeia. De acordo com os padrões europeus (tabela 2.5) o número máximo de violações ao padrão não podem passar de 25 dias calculados ao longo de 3 anos. Nota-se na tabela que em nenhum período analisado ocorreram violações ao permitido pela comissão europeia. O número máximo de violações obtida pela legislação europeia foi de 9 dias.

A *EPA* estabelece como método de análise dos padrões de ozônio que a média ao

Tabela 4.6: Violações do padrão brasileiro de $[O_3]$ na Ouvidor Pardinho no período de estudo (2003-2015)

Ano	Data	Hora	$[O_3]$ (ppb)
2007	08/set	16 h	87,6
2008	08/fev	14 h	83,5
	19/out	16 h	97,3
2010	21/out	14 h	82,8
	21/out	15 h	86,3
	28/out	13 h	82,1

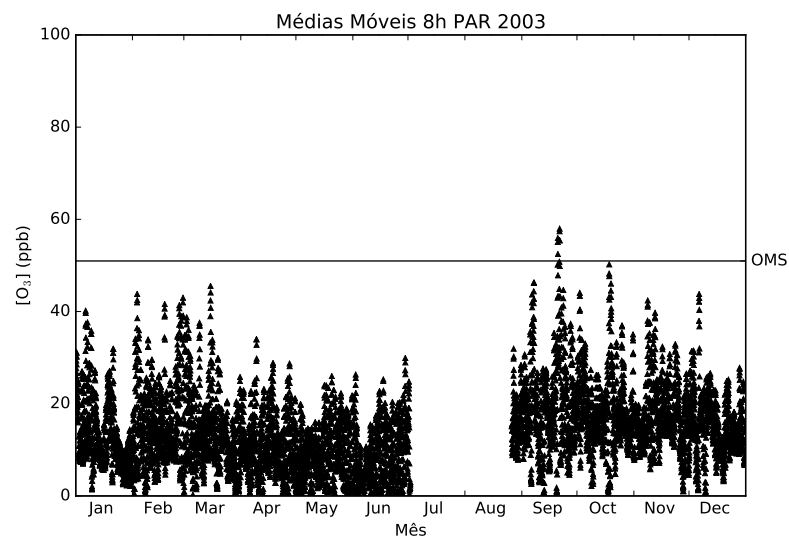


Figura 4.6: Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardinho no ano de 2003

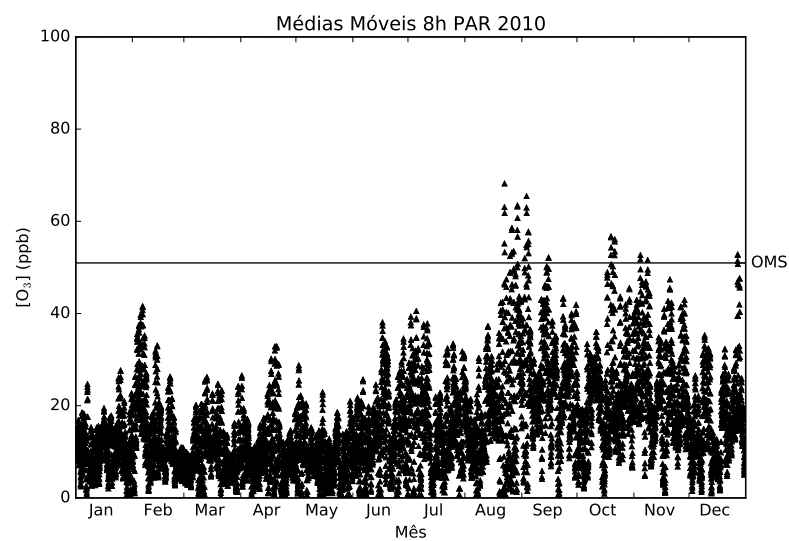


Figura 4.7: Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardinho no ano de 2010

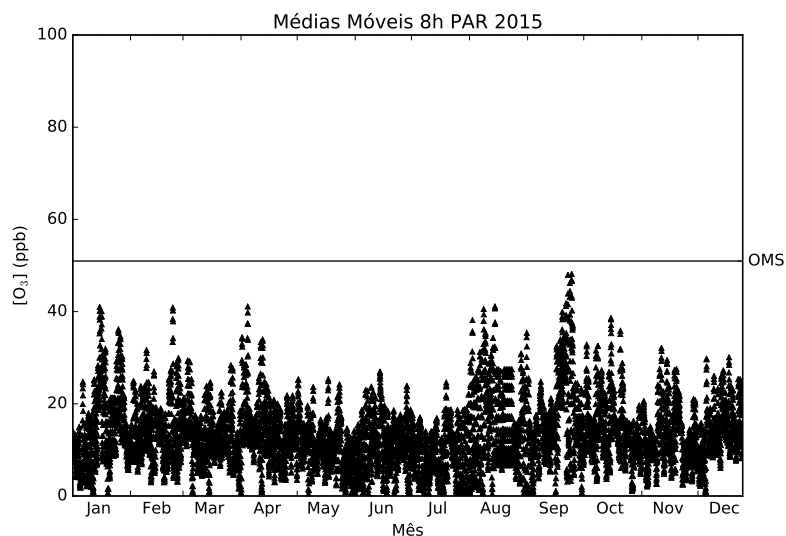


Figura 4.8: Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardino no ano de 2015

Tabela 4.7: Número de violações do padrão de [O₃] na estação Ouvidor Pardino de acordo a OMS

Ano	Extrapolações	Ano	Extrapolações
2003	7	2010	52
2004	0	2011	0
2005	0	2012	0
2006	4	2013	0
2007	23	2014	25
2008	0	2015	0
2009	0		

Tabela 4.8: Número de extrapolações do padrão de [O₃] na estação Ouvidor Pardino de acordo a legislação europeia

Anos	Extrapolações (dias)	Anos	Extrapolações (dias)
2003-2005	0	2009-2011	9
2004-2006	0	2010-2012	9
2005-2007	3	2011-2013	0
2006-2008	3	2012-2014	0
2007-2009	3	2013-2015	0
2008-2010	9		

Tabela 4.9: Valores máximos das médias de 8 horas das concentrações de ozônio para cada ano e a média das quatro maiores concentrações ao longo de 3 anos

Ano	Valores máximos				média de 3 anos
2003	57,98	57,41	55,92	55,50	
2004	48,05	47,91	46,65	44,98	
2005	50,26	48,52	47,84	45,20	48,56
2006	53,51	52,79	52,23	51,51	47,23
2007	63,89	62,68	61,15	58,91	51,87
2008	45,20	45,12	42,34	40,48	50,30
2009	49,74	49,51	47,74	47,21	48,87
2010	68,20	65,46	63,45	63,20	50,30
2011	49,26	48,90	47,71	47,60	52,67
2012	45,06	44,16	43,74	42,73	51,18
2013	44,21	43,40	43,19	42,15	44,16
2014	57,88	57,74	57,59	57,49	47,46
2015	48,18	47,94	47,93	46,90	48,85

* Todas as concentrações estão em ppb

Tabela 4.10: Violações aos padrões americanos (EUA) e europeus (EUR) durante os anos de 2003 a 2010

	2003-2005	2004-2006	2005-2007	2006-2008	2007-2009	2008-2010
EUA	0	0	0	0	0	0
EUR	0	0	0	0	0	0

longo de três anos das quatro maiores concentrações de ozônio anuais não podem ultrapassar 70 ppb (tabela 2.4). A tabela 4.9 representa as maiores médias das concentrações de ozônio ao longo de 3 anos. As concentrações em negrito são as que foram usadas no cálculo das médias ao longo de 3 anos. Essas médias também estão representadas na tabela. Como nenhuma média ultrapassou 70 ppb conclui-se que em nenhum ano do período de estudo extrapolou o limite estabelecido.

Uma comparação das violações obtidas sob as diferentes legislações aqui avaliadas podem ser vistas nas tabelas 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13. As tabelas foram divididas em 2 grupos sendo eles, o primeiro de legislações que utilizam médias ao longo de três anos (europeia e americana) e um grupo dos padrões que avaliam ano a ano as violações (brasileira e da OMS). A tabela 4.10 e 4.11 representam o primeiro grupo. Observa-se que para nenhum período ocorreram violações aos padrões estabelecidos por nenhuma das duas leis desse grupo. Entretanto, no grupo que avalia cada ano individualmente houveram violações aos padrões impostos tanto pela lei brasileira quanto pelas diretrizes da OMS (tabelas 4.12 e 4.13).

A figura 4.9 apresenta um gráfico boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio

Tabela 4.11: Violações aos padrões americanos (EUA) e europeus (EUR) durante os anos de 2009 a 2015

	2009-2011	2010-2012	2011-2013	2012-2014	2013-2015
EUA	0	0	0	0	0
EUR	0	0	0	0	0

Tabela 4.12: Violações aos padrões brasileiros (BR) e da Organização Mundial da Saúde (OMS) durante os anos de 2003 a 2009

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
BR	0	0	0	0	1	1	0
OMS	7	0	0	4	23	0	0

na estação da Ouvidor Pardinho. Observa-se que de todos os anos do estudo, o ano de 2010 é o que mais possui concentrações elevadas de ozônio, com um valor de mediana maior que 70 ppb. Em 2007 as 30 maiores concentrações possuem uma mediana entre 60 e 70 ppb. Com exceção desses dois anos, a mediana das maiores concentrações se encontram sempre abaixo ou próximas de 60 ppb.

O comportamento das concentrações de ozônio em cada estação do ano está representado na figura 4.10. Na figura é possível notar que durante a Primavera e Inverno as medianas das maiores concentrações são maiores do que no Verão e Outono. O comportamento das estações do ano para cada ano da série podem ser vistas no apêndice nas figuras A.24 a A.30.

De uma maneira geral a legislação brasileira, durante o período de estudo, não apresentou muitas violações. Conforme visto nas tabelas 4.6, ocorreram 6 violações sendo que 4 delas em 2010. Em 2003, durante os meses de Julho e Agosto não ocorreu a medição de ozônio (figura A.24a). A justificativa segundo o IAP foi que a estação sofreu atos de vandalismo e teve que ir para a manutenção nesse período. Nesse mesmo ano percebe-se que não ocorreu nenhuma violação ao padrão brasileiro. Já no ano de 2010 (figura A.27b), vê-se que ocorreram 4 violações. Observa-se pelo histograma da distribuição das concentrações que em 2007 e 2010 (figuras A.4b e 4.4b, respectivamente) a ocorrência de concentrações mais elevadas de ozônio. Em todo o período da série,

Tabela 4.13: Violações aos padrões brasileiros (BR) e da Organização Mundial da Saúde (OMS) durante os anos de 2010 a 2015

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
BR	4	0	0	0	0	0
OMS	52	0	0	0	25	0

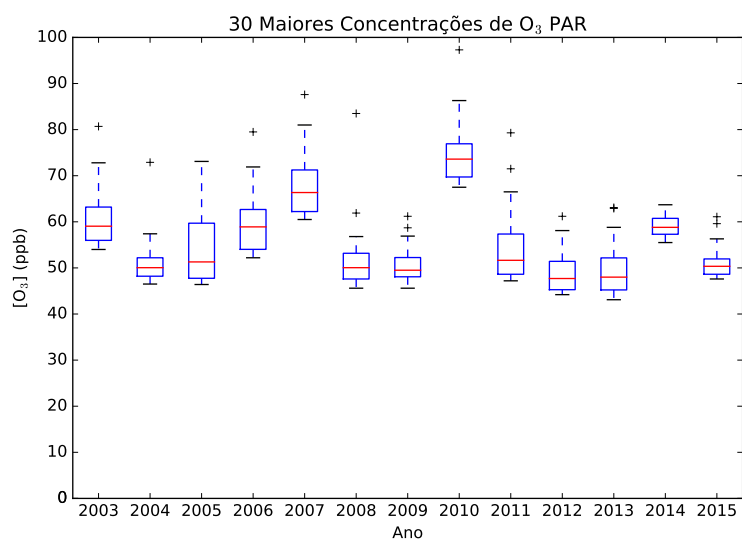


Figura 4.9: Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio no período estudado na estação Ouvidor Pardinho

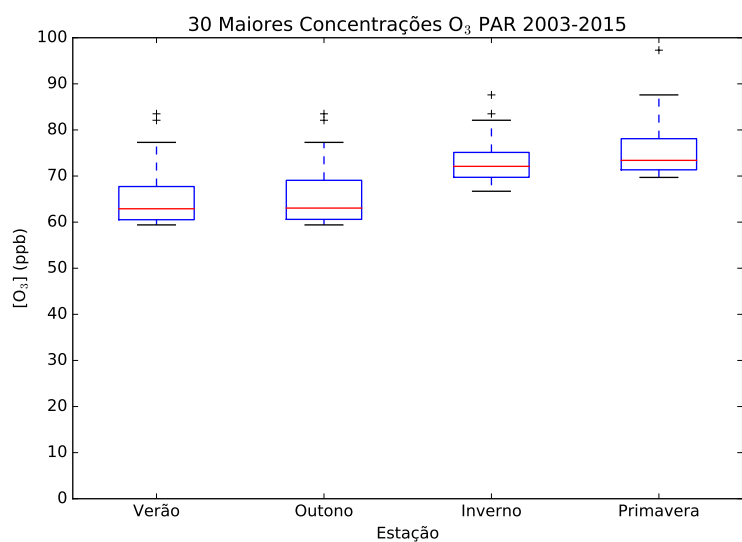


Figura 4.10: Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio em cada estação do ano na estação Ouvidor Pardinho

esses dois anos foram os que mais tiveram concentrações mais elevadas em relação aos demais. Fato que pode ser comprovado analisando a figura 4.9.

Na perspectiva da legislação americana e europeia não ocorreu nenhuma violação aos padrões impostos por cada uma das legislações (conforme as tabelas 4.10 e 4.11, respectivamente). A realização do cálculo das médias móveis e o uso de métodos diferentes de definições de violações demonstra que os métodos de descritos pelas legislações americana e europeia podem não ser tão rígidos como o imposto pela legislação brasileira. Entretanto, nesse trabalho, as metodologias descritas pela EPA foram aplicadas à legislação europeia e nas diretivas da OMS. Logo, não podemos concluir com exatidão qual das legislações pode ser a mais rigorosa em termos de concentrações de ozônio.

Já a Organização Mundial da Saúde (OMS) foi a que apresentou suas diretrizes de concentração de ozônio mais severas do que todas as outras legislações analisadas nesse trabalho. Por exemplo, os anos de 2007, 2010 e 2014 apresentaram 23, 52 e 25 violações ao padrão da OMS, respectivamente (tabelas 4.12 e 4.13).

Analisando o comportamento das maiores concentrações de ozônio 4.9, verificamos que não é possível dizer que as concentrações de ozônio estão ficando maiores ou menores ao longo dos anos. O comportamento das maiores concentrações é aleatório, em anos as concentrações são mais elevadas enquanto outros são menores. Como mencionado no capítulo 3 um dos maiores responsáveis pela formação de ozônio são os combustíveis fósseis (Baird e Cann, 2011) e conforme dito no mesmo capítulo a frota de carros aumentou 40% entre 2004 e 2010. Logo, poderia ser considerado que era esperado encontrar uma elevação nas maiores concentrações de ozônio ao longo dos anos. Porém, não conseguiu-se obter nem um padrão de aumento nem um padrão de diminuição das concentrações de ozônio.

Observando-se as concentrações de ozônio durante as estações do ano (Verão, Outono, Inverno e Primavera) nas figuras A.20, A.21, A.22 e A.23 nota-se que as concentrações mais elevadas de ozônio nos anos de 2007 e 2010 ocorreram durante o Inverno e Primavera. E como pode-se observar foram justamente nessas estações que ocorreram violações a legislação brasileira (tabela 4.6).

É interessante ressaltar que a análise feita sob a perspectiva das maiores concentrações analisadas sobre o período inteiro de estudo mostrou que as maiores concentrações de ozônio ocorrem durante o Inverno e Primavera. Um das possíveis explicações para isso é que o tamanho da camada limite planetária durante o inverno, por exemplo, é menor que em outras estações (SOUZA e LANGARO, 2012). Outra hipótese a ser considerada é que mesmo com um aumento da frota de veículos houve uma melhoria, por exemplo, nos motores dos veículos movidos a combustíveis fósseis.

Capítulo 5

Conclusões e Recomendações

A qualidade do ar durante os anos de 2003 a 2015, sob a perspectiva do ozônio na estação da praça Ouvidor Pardiniho, apresentou algumas violações aos limites estabelecidos pela legislação brasileira e OMS (figuras 4.12 e 4.13). E sob a perspectiva dos limites das legislações europeia e americana não houveram violações nesse período (figuras 4.10 e 4.13).

A legislação brasileira é a mais antiga do que as demais. Entretanto, mesmo que mais atualizadas, as legislações americanas e europeias podem ser consideradas não tão severas como a legislação brasileira. Vale ressaltar que os métodos de avaliações dos padrões avaliados nesse trabalho são diferentes. Enquanto a legislação brasileira avalia as concentrações horárias as demais avaliam as concentrações ao longo de 8 horas. Avaliar as concentrações de uma série de médias ao longo de 8 horas ocasionam uma suavização das concentrações medidas de hora em hora. Isso é uma das maiores diferenças entre o método de avaliação brasileiro e os demais. A legislação brasileira avalia atualmente os picos pontuais de concentrações enquanto a média de 8 horas suaviza esses picos.

É interessante notar que a OMS também utiliza como critério as concentrações ao longo de 8 horas, porém, a diretriz apresentada pela OMS foi a que mais obteve violações durante o período analisado. Isso é devido ao fato que a OMS utiliza critérios muito mais rigorosos do que os critérios apresentados pelas legislações europeias e americanas que também utilizam as médias de 8 horas.

Analisando as estações dos anos observamos que as concentrações mais elevadas de ozônio ocorreram durante o inverno e primavera. E que, de maneira geral, as concentrações de ozônio durante o inverno podem ser tão altas quanto no verão.

Podemos concluir que a qualidade do ar de Curitiba e Região Metropolitana sob a perspectiva do ozônio durante 2003 e 2015 para a Estação da Praça Ouvidor Pardiniho, sob diferentes padrões avaliados não apresenta muitas violações. O padrão que apresentou um maior número de violação foi o estabelecido pela Organização Mundial da Saúde (OMS). Entretanto, esse trabalho somente avaliou somente uma das 12 estações

de monitoramento presentes em Curitiba e RMC. Além do que somente as concentrações de ozônio foram avaliadas. Portanto, recomenda-se avaliar a qualidade do ar sob a perspectiva de outros poluentes para obter com uma maior exatidão a real situação da qualidade do ar de Curitiba.

Apêndice A

Figuras dos resultados

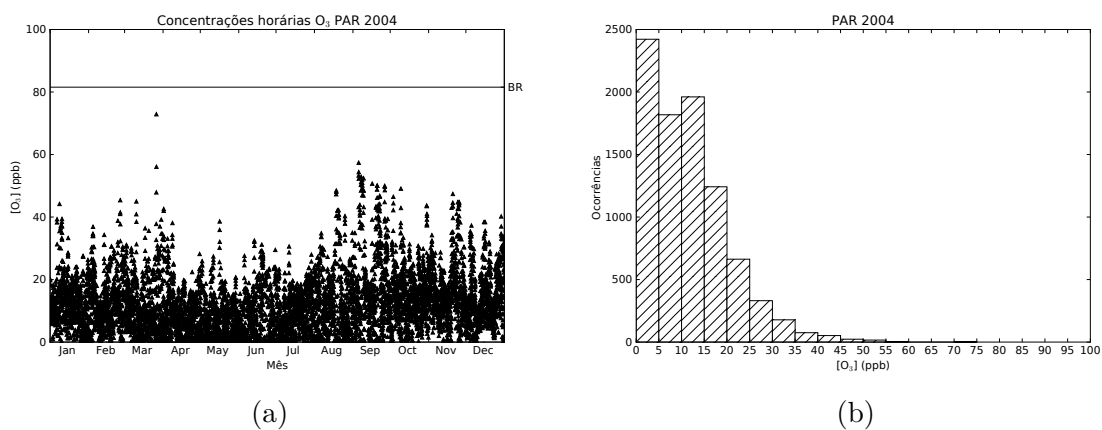


Figura A.1: (a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2004.

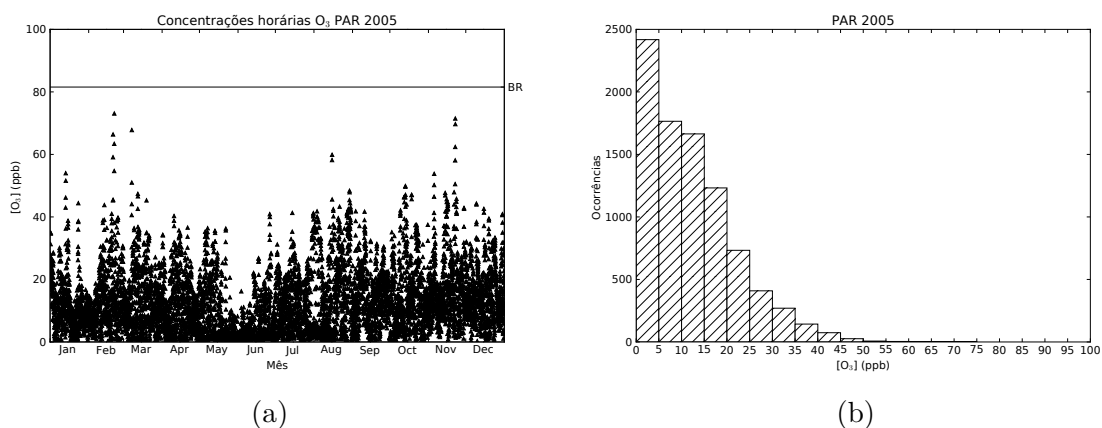
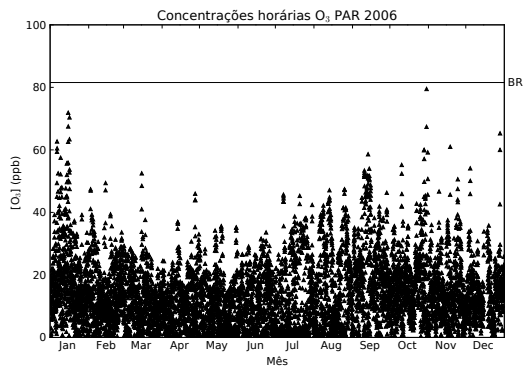
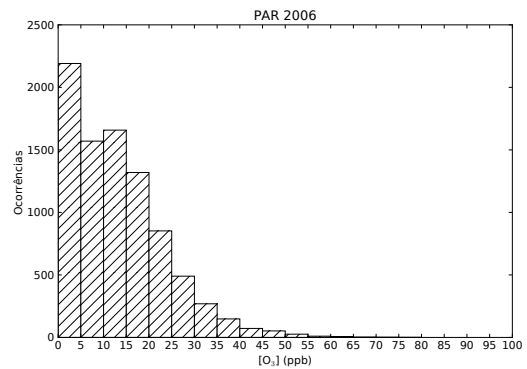


Figura A.2: (a)Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2005.

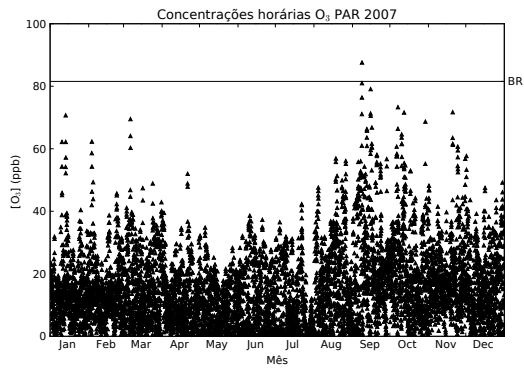


(a)

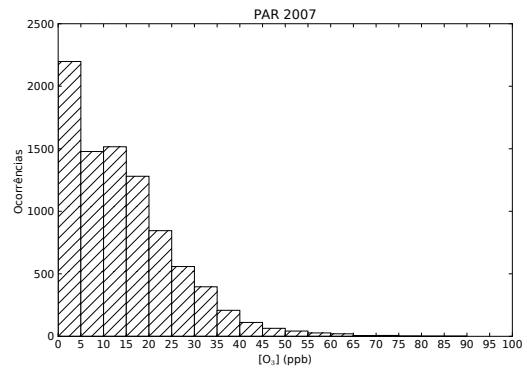


(b)

Figura A.3: (a) Concentrações e (a) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2006.

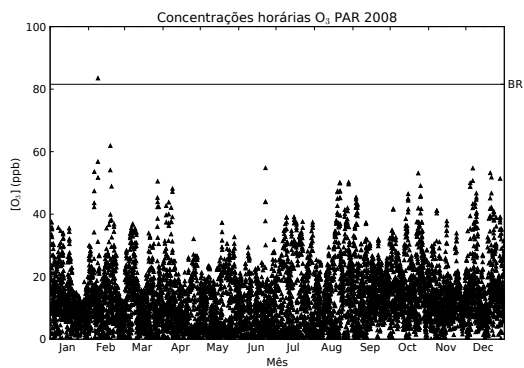


(a)

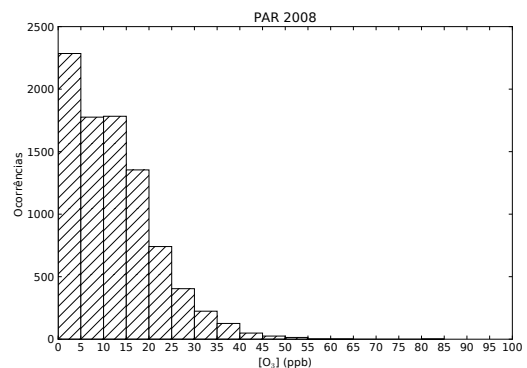


(b)

Figura A.4: (a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2007.

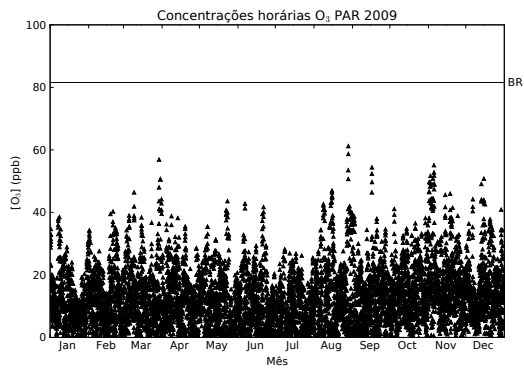


(a)

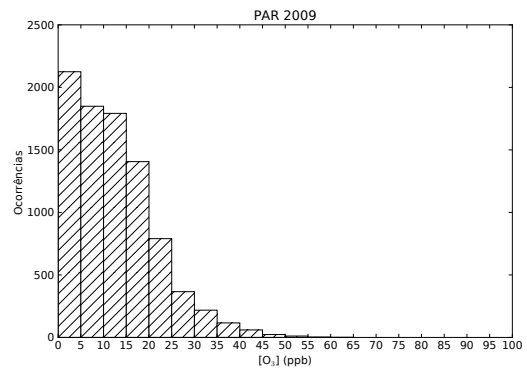


(b)

Figura A.5: (a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardiniho no ano de 2008.

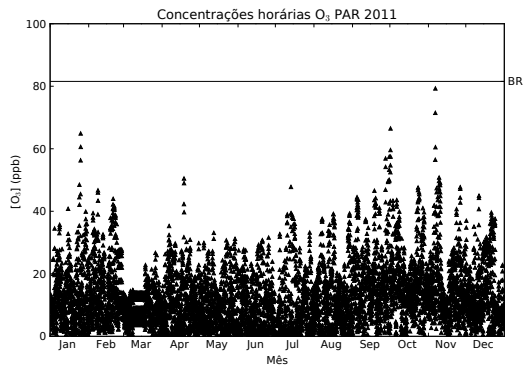


(a)

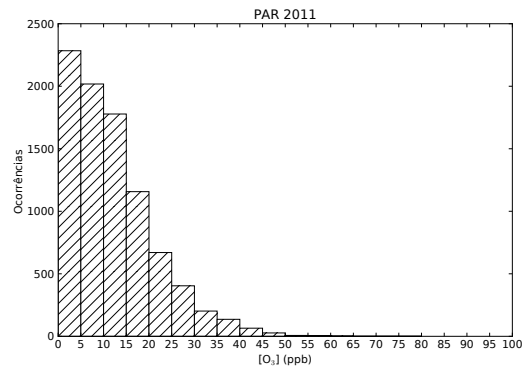


(b)

Figura A.6: (a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardinho no ano de 2009.

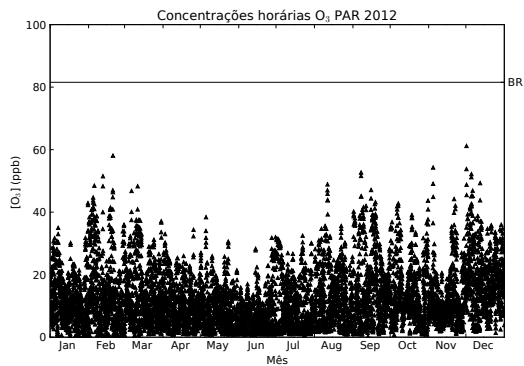


(a)

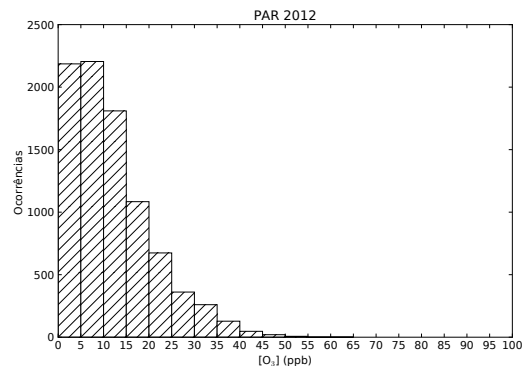


(b)

Figura A.7: (a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardinho no ano de 2011.



(a)



(b)

Figura A.8: (a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardinho no ano de 2012.

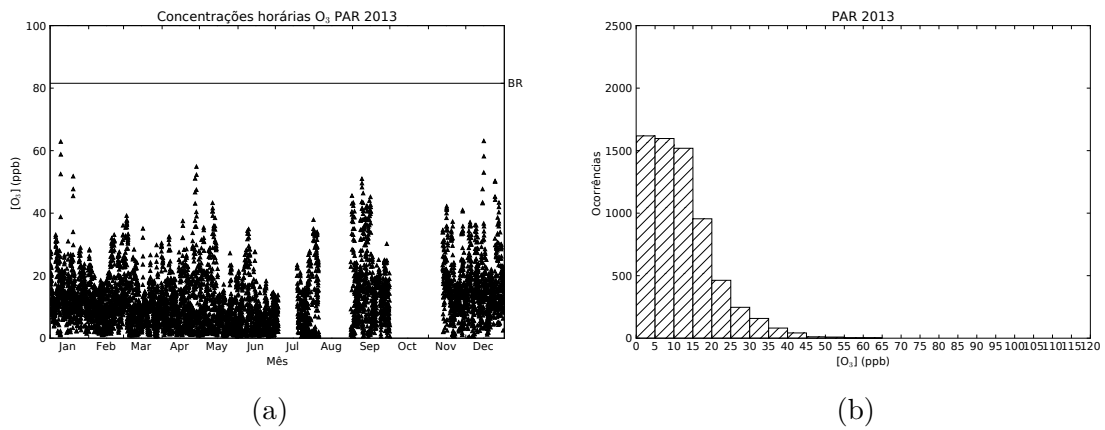


Figura A.9: (a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardinho no ano de 2013.

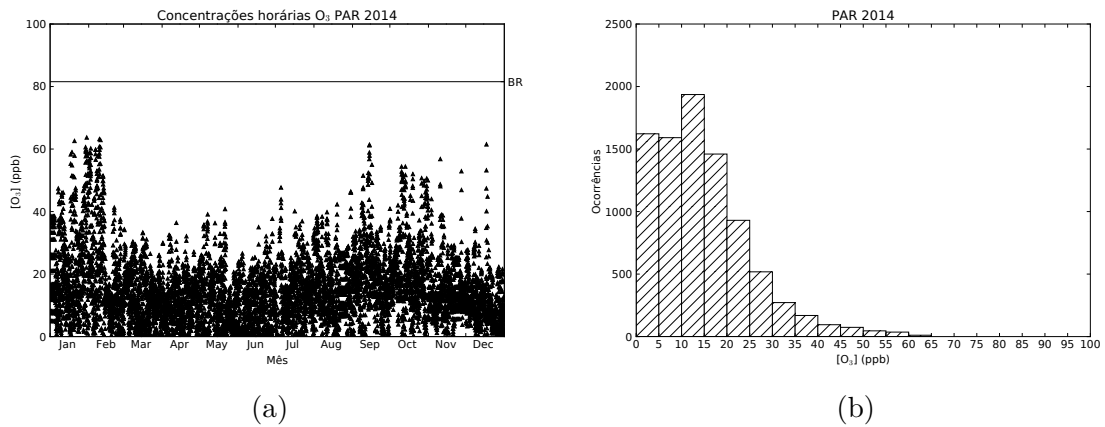


Figura A.10: (a) Concentrações e (b) histograma da distribuição das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardinho no ano de 2014.

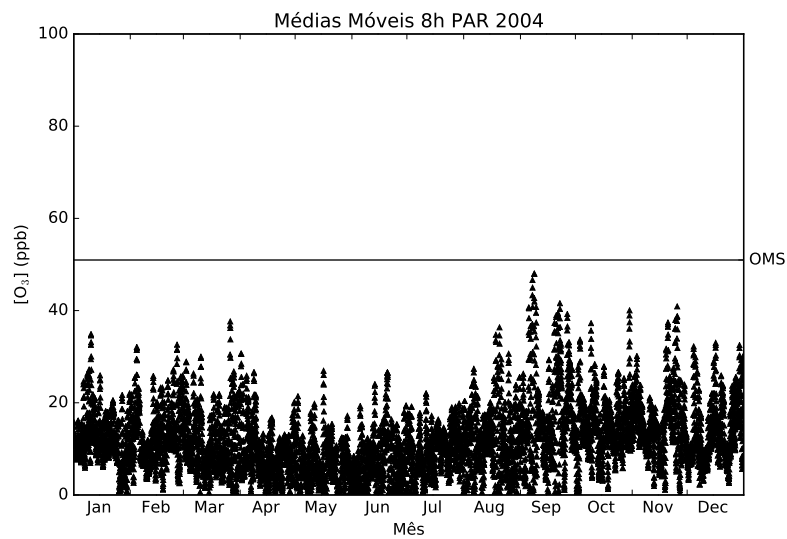


Figura A.11: Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardinho no ano de 2004

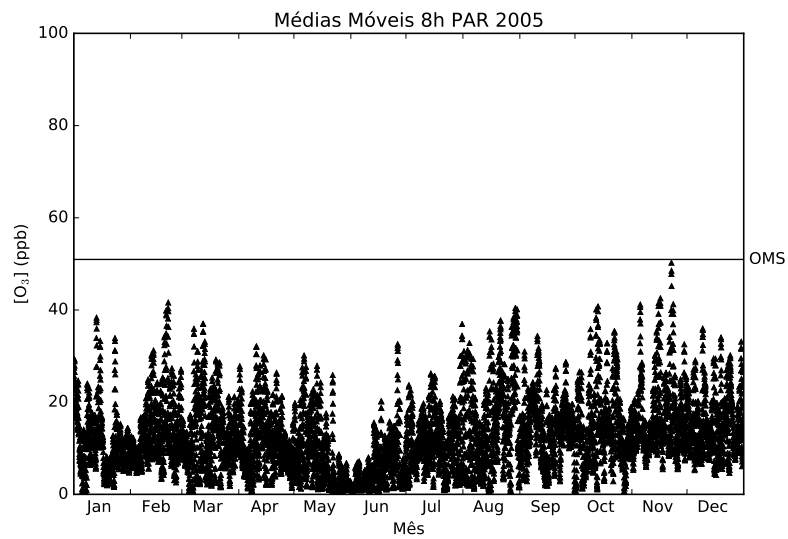


Figura A.12: Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardino no ano de 2005

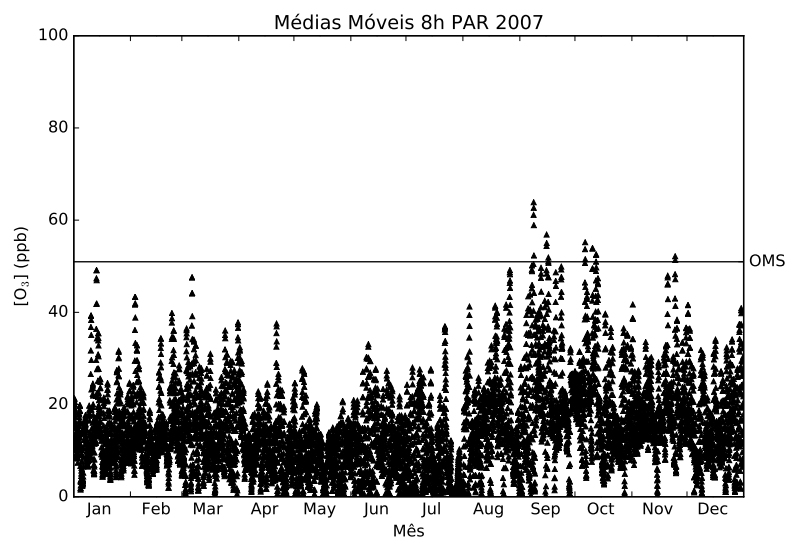


Figura A.13: Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardino no ano de 2007

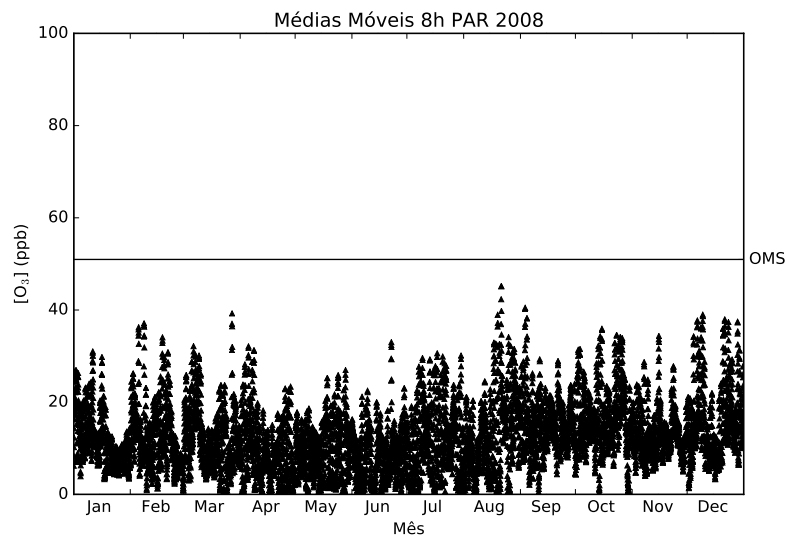


Figura A.14: Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardino no ano de 2008

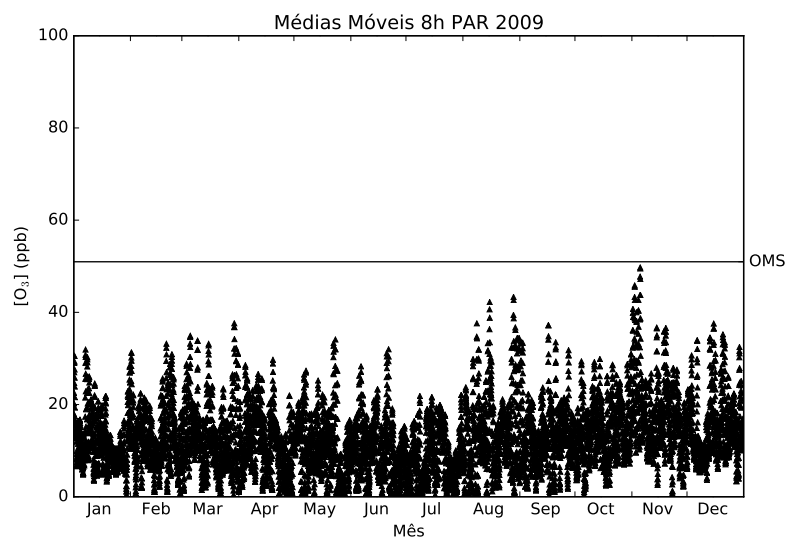


Figura A.15: Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardino no ano de 2009

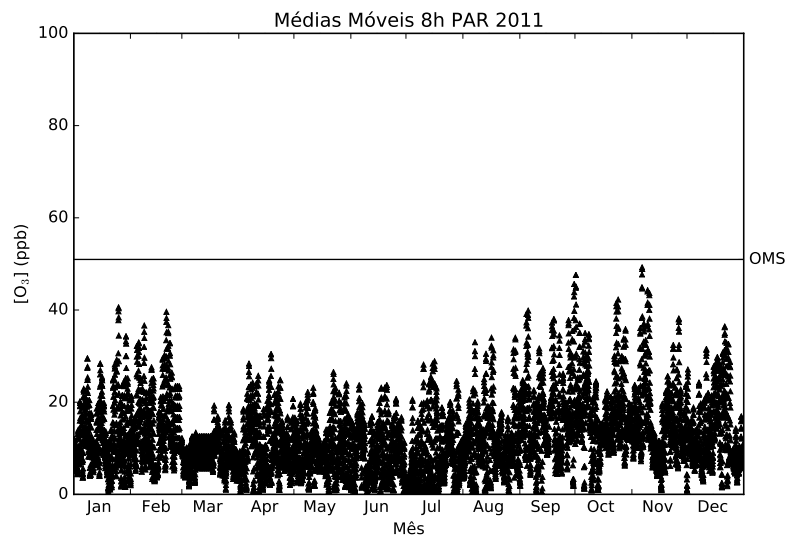


Figura A.16: Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardinho no ano de 2011

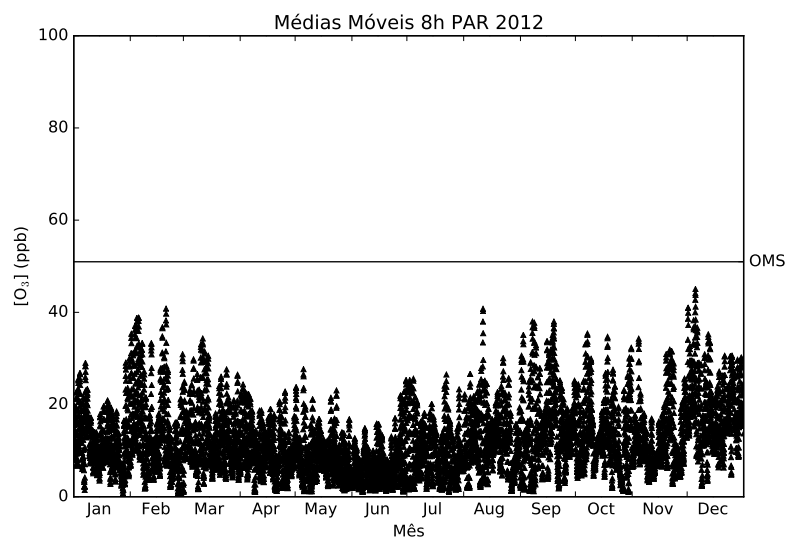


Figura A.17: Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardinho no ano de 2012

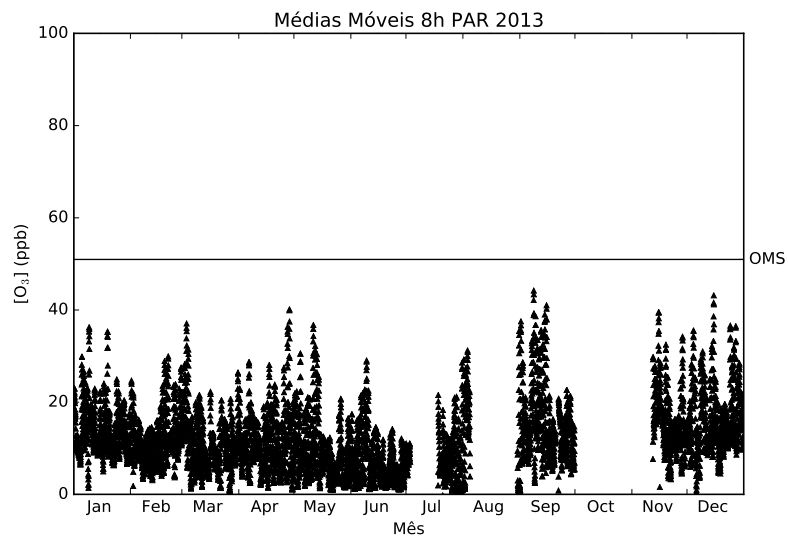


Figura A.18: Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardino no ano de 2013

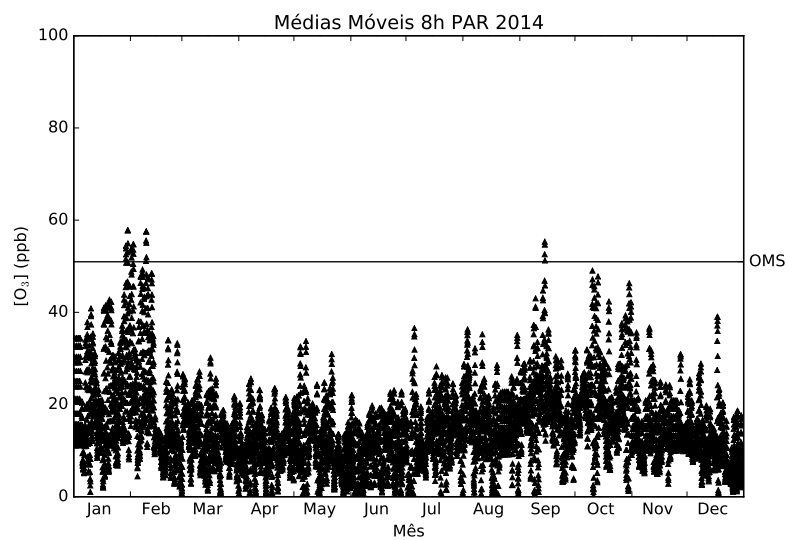


Figura A.19: Médias móveis de 8 horas das concentrações de ozônio na estação Ouvidor Pardino no ano de 2014

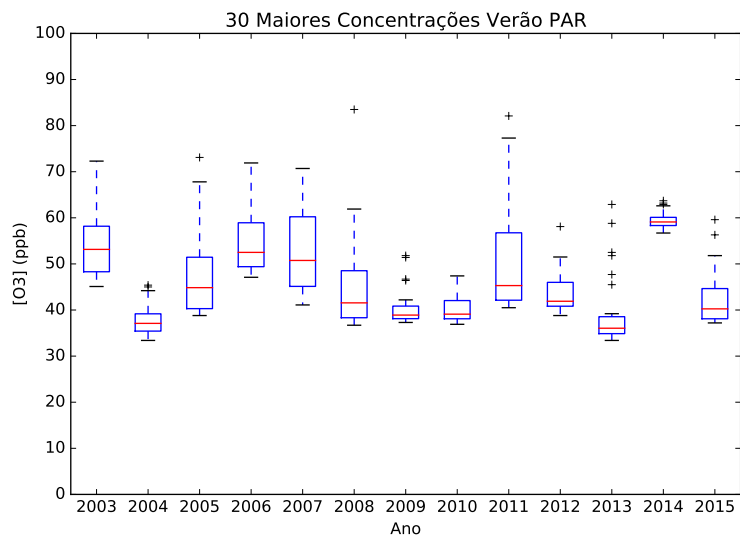


Figura A.20: Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardinho no Verão

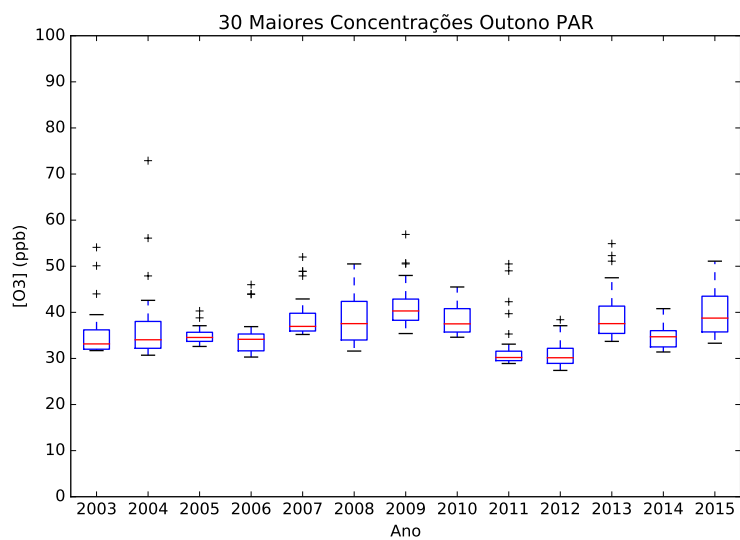


Figura A.21: Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardinho no Outono

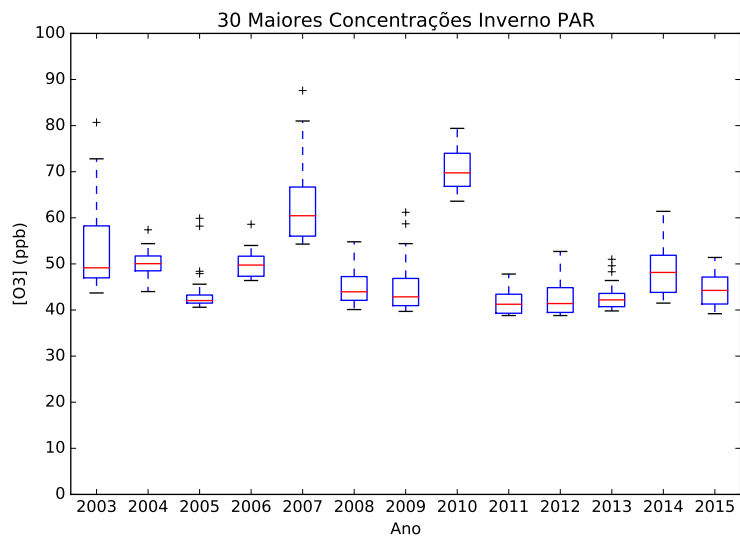


Figura A.22: Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardino no Inverno

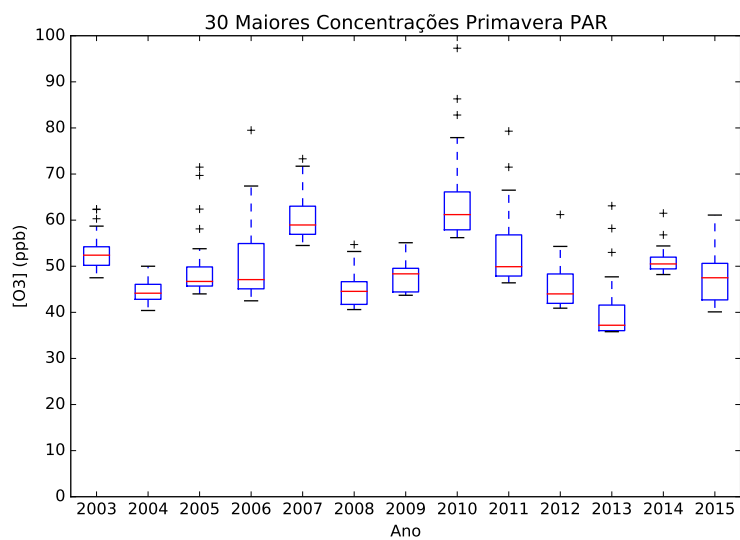
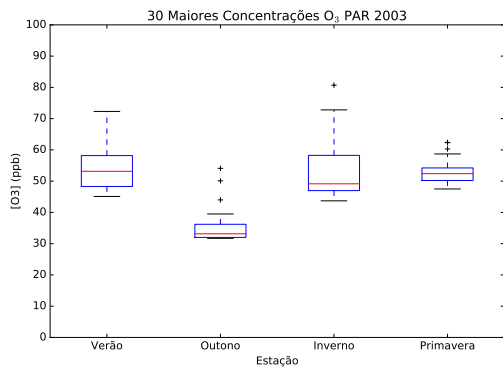
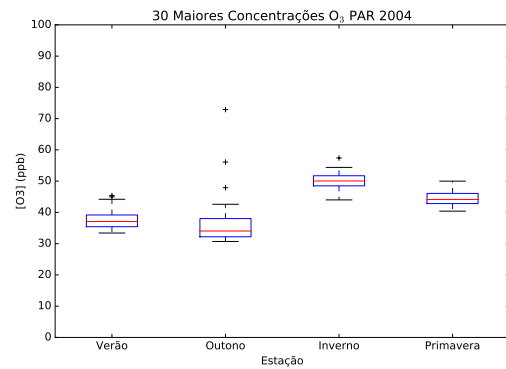


Figura A.23: Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardino no Primavera

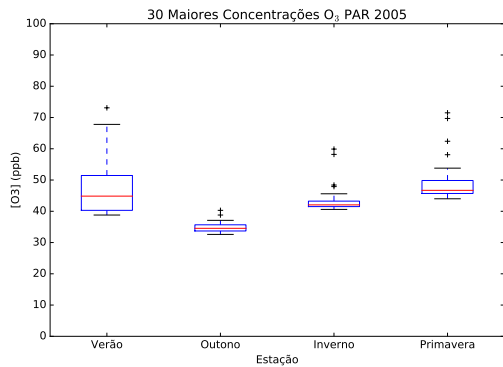


(a)

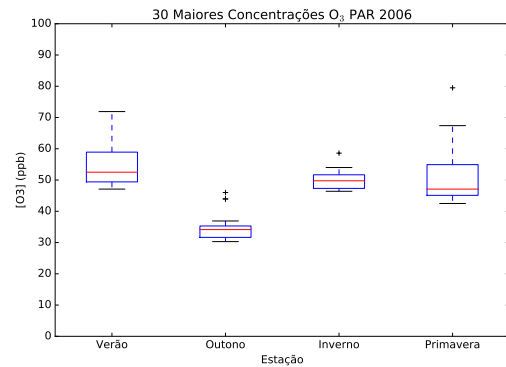


(b)

Figura A.24: Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardiniho nos anos de (a) 2003 e (b) 2004

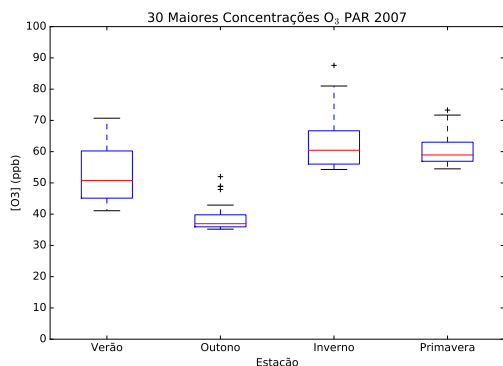


(a)

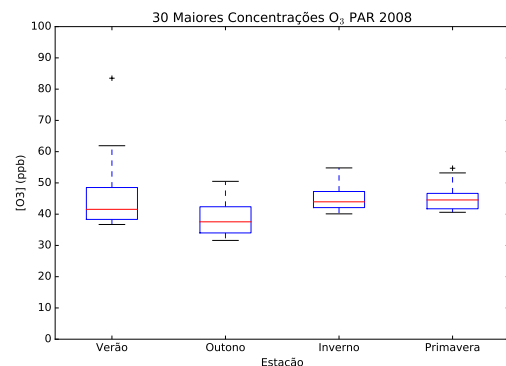


(b)

Figura A.25: Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardiniho nos anos de (a) 2005 e (b) 2006

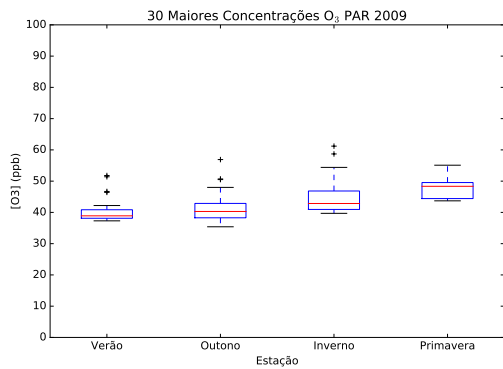


(a)

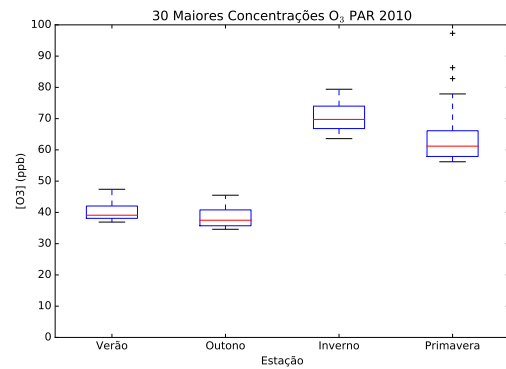


(b)

Figura A.26: Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardiniho nos anos de (a) 2007 e (b) 2008

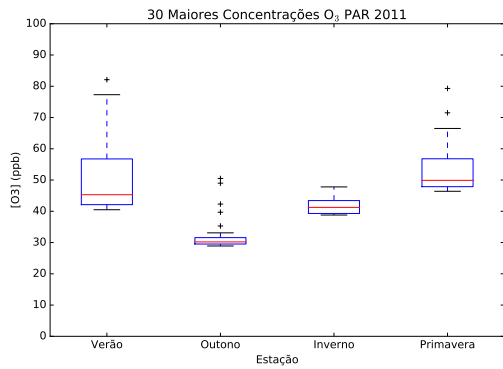


(a)

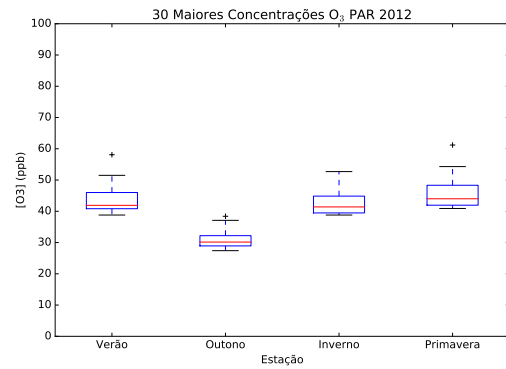


(b)

Figura A.27: Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardiniho nos anos de (a) 2009 e (b) 2010

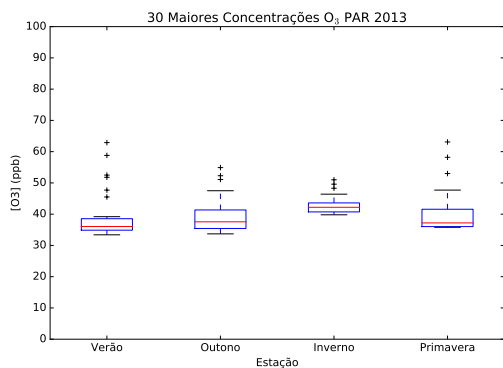


(a)

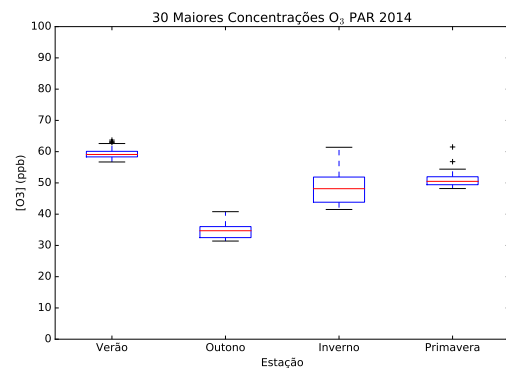


(b)

Figura A.28: Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardiniho nos anos de (a) 2011 e (b) 2012



(a)



(b)

Figura A.29: Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardiniho nos anos de (a) 2013 e (b) 2014

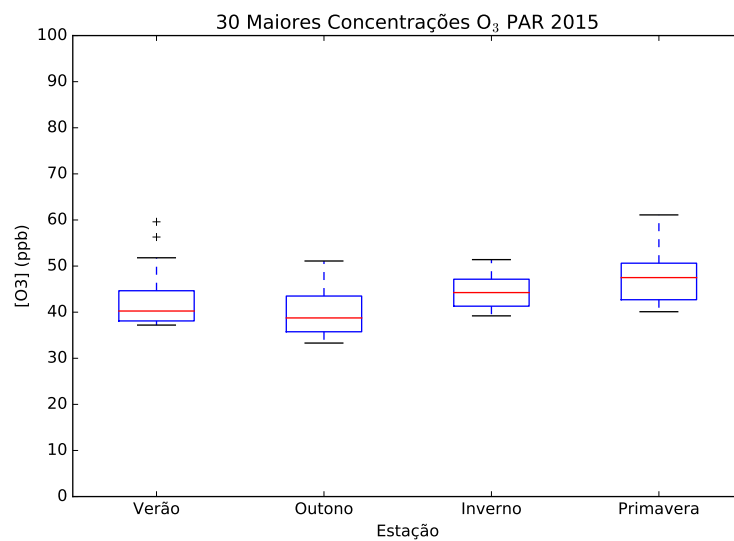


Figura A.30: Boxplot das 30 maiores concentrações de ozônio na Ouvidor Pardiniho nos anos de 2015

Referências Bibliográficas

- Andrews, J. E., Brimblecombe, P., Jickells, T. D., Liss, P. S., e Reid, B. (2003). *An Introduction to Environmental Chemistry*. Wiley-Blackwell.
- Baird, C. e Cann, M. (2011). *Química ambiental*. BOOKMAN - GRUPO A.
- Bell, M. L. e Davis, D. L. (2001). Reassessment of the lethal London fog of 1952: novel indicators of acute and chronic consequences of acute exposure to air pollution. *Environmental health perspectives*, 109(Suppl 3):389.
- Cançado, J. E. D., Braga, A., Pereira, L. A. A., Arbex, M. A., Saldiva, P. H. N., e Santos, U. d. P. (2006). Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica. *J. bras. pneumol.*, 32:S5 – S11.
- Castro, A. H., Silva, G. M., e Araújo, R. S. (2013). Qualidade do ar - parâmetros de controle e efeitos na saúde humana: uma breve revisão. *HOLOS*, 5(0):107 – 121.
- Codato, G. (2008). Simulação numérica da evolução diurna do monóxido de carbono na camada limite planetária sobre a RMSP com modelo LES. Tese de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - USP.
- COMEC (2015). Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba. Disponível em <http://www.comec.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=123>.
- CONAMA (1989). Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução número 005, de 15/06/89. Dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar - PRONAR. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=81>.
- CONAMA (1990). Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução número 003, de 28/06/90. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100>.

- Dallarosa, J. B. (2005). *Estudo da formação e dispersão de ozônio troposférico em áreas de atividade de processamento de carvão aplicando modelos numéricos*. Tese de Doutorado, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL.
- Danni-Oliveira, I. M. (2010). Aspectos climáticos de Curitiba - PR: uma contribuição para o Ensino Médio. *Raega - O Espaço Geográfico em Análise*, 3(0).
- DETRAN (2014). Departamento de Trânsito do Paraná. Disponível em <http://www.detran.pr.gov.br/arquivos/File/estatisticasdetransito/anuario/Anuario2014.pdf>.
- Dias, N. L., Gobbi, M. F., e de Lourdes da Nóbrega Cunha, C. (2012). *Estado da Arte em Ciclo do Carbono em Reservatórios*, capítulo Abordagens micrometeorológicas para a estimativa de fluxos de gases de efeito estufa entre a superfície e a atmosfera, páginas 192 –237. Jorge Machado Damázio, org., 1ª edição.
- EC (2008). European Commission. Disponível em <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/>.
- Eisinger, M. e Burrows, J. P. (1998). Tropospheric sulfur dioxide observed by the ERS-2 GOME instrument. *Geophysical Research Letters*, 25(22):4177 – 4180.
- EPA (1998). Guideline on data handling conventions for the 8-hour ozone NAAQS. Disponível em <https://www3.epa.gov/ttn/caaa/t1/memoranda/guidefin.pdf>.
- EPA (2015). Environmental Protection Agency. Disponível em <http://www.epa.gov/ttn/naaqs/criteria.html>.
- Garcia-Menendez, F., Saari, R. K., Monier, E., e Selin, N. E. (2015). U.S. Air Quality and Health Benefits from Avoided Climate Change under Greenhouse Gas Mitigation. *Environ. Sci. Technol.*, 49(13):7580 – 7588.
- Gouveia, N., Freitas, C. U. d., Martins, L. C., e Marcilio, I. O. (2006). Hospitalizações por causas respiratórias e cardiovasculares associadas à contaminação atmosférica no Município de São Paulo, Brasil. *Cad Saúde Pública*, 22(12):2669–77.
- Gouveia, N., Mendonça, G. A. e S., Leon, A. P. d., Correia, J. E. d. M., Junger, W. L., Freitas, C. U. d., Dumas, R. P., Martins, L. C., Giussepe, L., Conceição, G. M., e et al. (2003). Poluição do ar e efeitos na saúde nas populações de duas grandes metrópoles brasileiras. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, 12(1).
- Hill, M. K. (1997). *Understanding Environmental Pollution*. Cambridge University Press.

- IPARDES (2015). Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. Disponível em http://www.ipardes.gov.br/perfil_municipal/MontaPerfil.php?codlocal=921&bt0k=ok.
- Isaksen, I., Granier, C., Myhre, G., Berntsen, T., Dalsøren, S., Gauss, M., Klimont, Z., Benestad, R., Bousquet, P., Collins, W., Cox, T., Eyring, V., Fowler, D., Fuzzi, S., Jöckel, P., Laj, P., Lohmann, U., Maione, M., Monks, P., Prevo, A., Raes, F., Richter, A., Rognerud, B., Schulz, M., Shindell, D., Stevenson, D., Storelvmo, T., Wang, W.-C., van Weele, M., Wild, M., e Wuebbles, D. (2009). Atmospheric composition change: Climate-Chemistry interactions. *Atmospheric Environment*, 43(33):5138 – 5192. {ACCENT} Synthesis.
- Jacques, S. M. C. (2003). *Bioestatística. Princípios e Aplicações*.
- Kunzli, N., Perez, L., e Rapp, R. (2010). Air Quality and Health. Disponível em <http://www.ersnet.org/images/stories/pdf/web-AQ2010-ENG.pdf>.
- Lazaridis, M. (2011). *First Principles of Meteorology and Air Pollution*. Springer Netherlands.
- Marufu, L. T. (2004). The 2003 North American electrical blackout: An accidental experiment in atmospheric chemistry. *Geophysical Research Letters*, 31(13).
- McConnell, R., Berhane, K., Gilliland, F., London, S. J., Islam, T., Gauderman, W. J., Avol, E., Margolis, H. G., e Peters, J. M. (2002). Asthma in exercising children exposed to ozone: a cohort study. *The Lancet*, 359(9304):386 – 391.
- Medina-Ramon, M. (2006). The Effect of Ozone and PM10 on Hospital Admissions for Pneumonia and Chronic Obstructive Pulmonary Disease: A National Multicity Study. *American Journal of Epidemiology*, 163(6):579–588.
- Montgomery, D. C. e Runger, G. C. (2009). *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*.
- Nardocci, A. C., Freitas, C. U. d., Ponce de Leon, A. C. M., Junger, W. L., e Gouveia, N. d. C. (2013). Poluição do ar e doenças respiratórias e cardiovasculares: estudo de séries temporais em Cubatão, São Paulo, Brasil. *Cad. Saúde Pública*, 29(9):1867 – 1876.
- Nemery, B., Hoet, P. H., e Nemmar, A. (2001). The Meuse Valley fog of 1930: an air pollution disaster. *The Lancet*, 357(9257):704 – 708.
- OMS (2005). Organização Mundial da Saúde. Disponível em http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69477/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf.

- Santana, E., da Cunha, K. B., Ferreira, A. L., e Zamboni, A. (2012). Disponível em http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/C1CB3034/Estudo_Padrees_Qualidade_Ar.pdf.
- Seinfeld, J. H. e Pandis, S. N. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. Wiley-Interscience.
- SEMA (2014). Secretária do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Resolução número 016/2014. Disponível em http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao_ambiental/Legislacao_estadual/RESOLUCOES/RES_SEMA_016_2014.pdf.
- SOUZA, E. D. e LANGARO, A. P. (2012). Estudo da relação entre ozônio e parâmetros meteorológicos na atmosfera de São Paulo. *Revista de Ciências Exatas e da Terra UNIGRAN*, 1(1).
- Vianna, N. A., Andrade, L. R. d., Souza-Machado, A., e Saldiva, P. H. (2008). Uma proposta de intersectorialidade para investigar poluição atmosférica e alergias respiratórias. *Gazeta Médica da Bahia*, 78(2).
- von Glasow, R., Jickells, T. D., Baklanov, A., Carmichael, G. R., Church, T. M., Gallardo, L., Hughes, C., Kanakidou, M., Liss, P. S., Mee, L., e et al. (2012). Megacities and Large Urban Agglomerations in the Coastal Zone: Interactions Between Atmosphere, Land, and Marine Ecosystems. *AMBIO*, 42(1):13–28.