

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

MARCOS AUGUSTO STOCO

**Dióxido de carbono na cidade de São Paulo: medidas em superfície e  
análises sazonais**

São Paulo

2022

MARCOS AUGUSTO STOCO

**Dióxido de carbono na cidade de São Paulo: medidas em superfície e análises sazonais**

Versão Corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade.

Dissertação apresentada ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Poluição do Ar

Orientador: Prof. Dra. Maria de Fátima Andrade

São Paulo

2022

*A minha família e amigos, sem vocês nada seria possível.*

## **Agradecimentos**

Primeiramente, agradeço a Deus, aos meus orixás e as minhas duas estrelas guias que me guardam lá do céu, minhas avós Claudete e Marcilene. Nos momentos mais obscuros vocês foram o meu farol e me devolveram ao caminho correto, dando a força necessária para continuar.

Em segundo lugar agradeço a minha família, que mesmo sob intensas turbulências nunca deixaram de acreditar no meu sonho, nunca me permitiram nem se quer pensar em desistir, mesmo que esse sentimento tenha surgido em inúmeras vezes. Sem vocês eu jamais chegaria onde estou hoje. Por isso, obrigado Dona Luciane, Seu Marcos e meu irmão Matheus.

Neste parágrafo aproveito para agradecer aos meus amigos, em especial a Franciele que convive comigo desde a época da graduação e conseguiu suportar meus surtos, mau humor e as crises durante o processo de desenvolvimento desta pesquisa, sem seu apoio esse trajeto teria sido bem mais difícil. Aproveito para agradecer também, pelos mesmos motivos, a Glorinha, aos amigos do “*Ofluxisca*”, a Elen, Leo e ao Lucas que entraram em minha vida durante o curso de pós graduação. A força necessária para continuar vinha sempre de um bom papo, sejam eles pelos corredores do IAG ou por meios virtuais.

Neste ponto eu não poderia deixar de agradecer a pessoa que mais me ajudou nesta pesquisa, a minha extraordinária orientadora Maria de Fátima. Eu nunca vou me cansar de agradecer e reconhecer o quanto você é uma pessoa incrível, extremamente inteligente e humana. Você não desistiu de mim mesmo quando eu já havia desistido, se esta pesquisa foi concluída foi graças ao seu incentivo. Por isto, meu muito obrigado, que outros possam conhecer e ser orientados por esta grande mulher. Aproveito este parágrafo também para agradecer a Rosana, Marcia, Thiago e a todas as pessoas que fazem parte do grupo LAPAT, vocês são demais.

Por fim, deixo aqui a lição que aprendi ao longo dos anos, nunca deixe de dizer o quanto você ama e reconhece as pessoas, você nunca saberá quando será a última vez.

*“Nunca deixe que ninguém lhe diga que não pode fazer algo. Se tem um sonho deve protegê-lo. Quando alguém não pode fazer algo diz que você não pode fazer também. Se quiser algo, vá atrás.”*

***A Procura da Felicidade.***

## Resumo

STOCO, M. A. **Dióxido de carbono na cidade de São Paulo: medidas em superfície e análises sazonais**. 2022. 123f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Desde, aproximadamente 11300 anos, nossa atmosfera apresenta uma composição química que permitiu e permite não só o surgimento da vida, como também a evolução dos seres vivos até os fenótipos que vemos hoje em dia. Porém, uma perturbação nas configurações de alguns constituintes da química atmosfera padrão pode resultar em mudanças no clima do planeta. Dentre esses constituintes, o Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) e o Metano (CH<sub>4</sub>), são conhecidos como Gases de Efeito Estufa (GEE), junto com outros compostos que interagem com a radiação solar e terrestre alterando o balanço radiativo do planeta. Atualmente, existem estudos envolvendo emissões de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, focados em grandes cidades para entender perfis de emissões destes poluentes e quais os impactos destas grandes cidades para o clima do planeta. São Paulo, como outras capitais no Brasil, possui um inventário de emissão de GEE, sendo importante ressaltar que esta cidade é a quinta maior megacidade do mundo. Mas há uma carência em medidas de GEE em áreas urbanas em todo o mundo. Sendo assim, este trabalho visa descrever a variabilidade temporal e espacial do dióxido de carbono na cidade de São Paulo (RMSP), utilizando medidas em superfície. Neste trabalho serão consideradas as medidas das concentrações de CO<sub>2</sub> que estão sendo realizadas em dois sítios na região de estudo, sendo um situado em uma região mais urbana (sítio do IAG, coordenadas 22°34' S e 46°44' O) e o outro em uma região à noroeste da área urbana da cidade, com maior presença de vegetação (sítio Pico do Jaraguá, coordenadas 23°27' S e 46°46' O). As medidas são realizadas com um monitor tipo CRDS (*Cavity ring-down spectroscopy*, marca Picarro) e acontecem desde 2013. Análises recentes nos dados mostram uma tendência de aumento nas medidas de concentração de CO<sub>2</sub> no sítio do IAG, desde 2013 até o ano de 2019. Já para o sítio do Pico do Jaraguá, não foi identificado este comportamento, pelo contrário, durante o ano de 2019 foi possível identificar uma, quase estabilidade nas concentrações, indicando que as fontes de emissão e/ou processos de sorvedouros de CO<sub>2</sub> neste sítio não variaram, quase que a longo do ano inteiro. A média das concentrações de CO<sub>2</sub> para o sítio do Pico do Jaraguá foi  $416,7 \pm 8,8$  ppm durante o ano de 2019, enquanto o sítio do IAG apresentou uma média de  $430,9 \pm 23,3$  ppm para o mesmo ano. As concentrações médias no Pico do Jaraguá se mantiveram 3,42% mais baixas que a média

das concentrações medidas no sítio do IAG, durante o ano de 2019. Retirando os finais de semana do cálculo das concentrações médias, a taxa de variação entre os sítios fica em 3,43%. Outros pontos destacados por esta pesquisa remetem à importância da velocidade do vento superior a  $2 \text{ ms}^{-1}$  na dispersão da pluma de  $\text{CO}_2$  presente no sítio do IAG, sendo estes ventos mais presentes durante as estações da primavera e do verão austral. As concentrações de  $\text{CO}_2$  em ambos os sítios durante o verão apresentaram a menor variação entre os valores mínimos, sendo que o Pico do Jaraguá registrou 401,94 ppm, enquanto o IAG registrou 403,34 ppm, o que representa uma taxa de variação de 0,35%. Em contrapartida, o inverno apresentou as maiores concentrações máximas em ambos os sítios, sendo o valor máximo registrado de 449,28 ppm no sítio do Pico do Jaraguá, e 525,14 ppm para o sítio do IAG. A maior variabilidade entre as concentrações máximas medidas nos dois sítios fora registrada durante o inverno, sendo 16,88% menor no Pico do Jaraguá quando comparada à concentração máxima medida no sítio do IAG. Outra variável meteorológica importante para redução da concentração do  $\text{CO}_2$  foi a precipitação, que causou uma redução nas concentrações máximas do gás durante o mês de novembro de 2019. As correlações horárias mostraram também uma forte relação do  $\text{CO}_2$  com o monóxido de carbono, para o sítio do IAG, porém, para o sítio do Pico do Jaraguá não houve correlações entre estes dois poluentes, indicando que as fontes atuantes no IAG, estão ligadas com a emissão antrópica, sendo a fonte mais provável o tráfego de veículos intensos próximo a este sítio. É notável também a atuação de sumidouros no sequestro do carbono pela vegetação em ambos os sítios o que deve ser melhor estudado em etapas futuras do trabalho.

Palavras-chave: Dióxido de Carbono; Variabilidade; Fontes; Sumidouro.

## Abstract

Since approximately 11300 years, our atmosphere has had a chemical composition that allowed and allows, not only the emergence of life, but also the evolution of living beings to the phenotypes we see today. However, a disturbance in the configuration of some constituents of the standard atmosphere chemistry can result in changes in the planet's climate. Among these constituents, Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) and Methane (CH<sub>4</sub>), are known as Greenhouse Gases (GHG), along with other compounds that interact with solar and terrestrial radiation, altering the radiative balance of the planet. Currently, there are studies involving CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions, focused on large cities to understand the emission profiles of these pollutants and the impacts of these large cities on the planet's climate. . São Paulo, like other capitals in Brazil, has a GHG emission inventory, and it is important to note that this city is the fifth largest megacity in the world. But there is a lack of GHG measurements in urban areas around the world. Therefore, this work aims to describe the temporal and spatial variability of carbon dioxide in the city of São Paulo (RMSP), using surface measurements (CO<sub>2</sub> concentration). In this work, the measurements of CO<sub>2</sub> concentrations that are being carried out in two sites in the study region will be considered, one located in a more urban region (IAG site) and the other in a region to the northwest of the urban area of the city, with greater amount of vegetation (Pico do Jaraguá site). The measurements are carried out with a CRDS type monitor (Cavity ring-down spectroscopy, Picarro brand) and have taken place since 2013. Recent analyzes of the data show an increasing trend in CO<sub>2</sub> contraction measurements at the IAG site, from 2013 to 2019. As for the site of Pico do Jaraguá, this behavior was not identified, on the contrary, during 2019 it was possible to identify an almost stability in concentrations, indicating that the sources of CO<sub>2</sub> emission at this site did not vary, almost throughout the entire year. The average CO<sub>2</sub> concentrations for the Pico do Jaraguá site was  $416.67 \pm 8.78$  ppm during the year 2019, while the IAG site presented an average of  $430.90 \pm 23.32$  ppm for the same year. Average concentrations at Pico do Jaraguá remained 3.42% lower than the average concentrations measured at the IAG site during 2019. Removing weekends from average concentrations, the rate of variation between sites increases to 3.43%. Other points highlighted by this research refer to the importance of a wind speed greater than  $2 \text{ m s}^{-1}$  in the dispersion of the CO<sub>2</sub> plume present at the IAG site, these winds being more present during the austral spring and summer seasons. CO<sub>2</sub> concentrations in both sites during the summer showed the smallest variation between the minimum values, with Pico do Jaraguá registering 401.94 ppm, while the IAG

registered 403.34 ppm, which represents a variation rate of 0.35%. On the other hand, winter showed the highest maximum concentrations in both sites, with the maximum recorded value of 449.28 ppm at the Pico do Jaraguá site, and 525.14 ppm at the IAG site. The greatest variability between the maximum concentrations measured at the two sites was recorded during the winter, being 16.88% lower at Pico do Jaraguá when compared to the maximum concentration measured at the IAG site. Another important meteorological variable for reducing the concentration of CO<sub>2</sub> was precipitation, which caused a reduction in the maximum concentrations of the gas during the month of November 2019. The hourly correlations also showed a strong relationship between CO<sub>2</sub> and carbon monoxide for the site of the IAG, however, for the Pico do Jaraguá site there were no correlations between these two pollutants, indicating that the sources acting in the IAG are linked to anthropogenic emission, the most likely source being the intense vehicle traffic near this site. The role of sinks in carbon sequestration by vegetation in both sites is also notable and should be better studied in future stages of the work.

Keywords: Carbon dioxide; Variability; Sources; Sink.

## Lista de figuras

- Figura 1 - Concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> e Oxigênio registrada nas últimas décadas em estações representativas, onde: a) CO<sub>2</sub> medido no centro de Mauna Loa (MLO), no Hemisfério Norte e na estação atmosférica no Polo Sul (SPO). b) O<sub>2</sub> medido nas estações Alert no Hemisfério Norte (ALT) e na estação de Cabo Grim, no Hemisfério Sul (CGO). Esta Figura foi retirada do capítulo 5 do quinto relatório do IPCC (Ciais et al., 2013).....26
- Figura 2 - Emissões de GEE no Brasil por Setor em 2016. Totais estimadas por CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2eq</sub>). (Imagem retirada do livro: Resultados de Inventários de Emissões de Gases do Efeito Estufa por Unidade Federativa, criado pelo MCTIC (M. da C. T. e I.-M. Brasil, 2021b). .....31
- Figura 3 - Série história de emissões e remoções de GEE do Brasil (M. da C. T. e I.-M. Brasil, 2021b).....31
- Figura 4 - Emissões totais de GEE para o Brasil, entre os anos de 1990 até 2016, divulgados no Quarto inventário nacional de emissões de GEE (M. da C. T. e I.-M. Brasil, 2021a) .....32
- Figura 5 - Emissões de gases de efeito estufa no Brasil, de 1990 a 2019 (em MtCO<sub>2eq</sub>). Figura retirada no relatório de emissões realizado por SEEG, 2020. ....34
- Figura 6 - Série histórica das emissões de CO<sub>2eq</sub> no estado de São Paulo. Gráfico retirado do 4 inventário nacional de emissões de GEE (M. da C. T. e I.-M. Brasil, 2021b)....35
- Figura 7 - Emissões de CO<sub>2eq</sub> no estado de São Paulo, onde: a) emissões referentes ao ano de 2005; b) emissões referentes ao ano de 2008. Imagem retirada do 1º Inventário de emissões estaduais (CETESB, 2011).....36
- Figura 8 - Emissões de CO<sub>2</sub> em toneladas para o estado de São Paulo, por setor. Gráfico elaborado pelo SEEG e encontra-se disponível em [https://plataforma.seeg.eco.br/total\\_emission](https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission), data de acesso 01/03/2022 .....36
- Figura 9 - Emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da queima de combustíveis fósseis estimadas pelas abordagens de referência (A) e setorial (B), no estado de São Paulo (CETESB, 2011).....38
- Figura 10 - Estimativas das emissões de GEE de origem veicular no estado de São Paulo em 2019, conforme relatório de emissões veiculares divulgados pela CETESB, 2020a. ....38

Figura 11 - Perfil das emissões percentuais do Município de São Paulo por GEE entre os anos de 2003 e 2009, divulgados pelo Inventário de emissões realizado por (EKOS & Geoklock, 2013). .....	39
Figura 12 - Perfil das emissões percentuais de CO <sub>2</sub> por setor, entre os anos de 2003 e 2009, dentro da cidade de São Paulo. Resultados retirados do Inventário de Emissão elaborado por (EKOS & Geoklock, 2013). .....	39
Figura 13 - Emissões de CO <sub>2</sub> , em toneladas, na cidade de São Paulo. Gráfico elaborado pelo SEEG e encontra-se disponível em <a href="https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission">https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission</a> , data de acesso 01/03/2022 .....	40
Figura 14 - Emissões de CO no Brasil, em Toneladas. Gráfico elaborado pelo SEEG e encontra-se disponível em <a href="https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission">https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission</a> , data de acesso 01/03/2022.....	43
Figura 15 - Evolução das médias anuais das concentrações máximas diárias (médias de 8 horas) para a RMSP .....	44
Figura 16 - Emissões de CO (em Toneladas), para o estado de São Paulo, por setor. Gráfico elaborado pelo SEEG e encontra-se disponível em <a href="https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission">https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission</a> , data de acesso 01/03/2022).....	45
Figura 17 - Emissões de CO (em Toneladas), para a cidade de São Paulo, por setor. Gráfico elaborado pelo SEEG e encontra-se disponível em <a href="https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission">https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission</a> , data de acesso 01/03/2022).....	46
Figura 18 - Região de Estudo desta pesquisa. Imagem adaptada pelo autor. Fonte: Raphael Lorenzeto de Abreu, disponível em < <a href="https://goo.gl/XSRoic">https://goo.gl/XSRoic</a> 20/08/2018> .....	52
Figura 19: a) Estação de coleta situada no IAG. b) Estação de coleta situada no Pico do Jaraguá. ....	54
Figura 20 - Características do entorno dos sítios de coleta. Fonte: Google Maps < <a href="https://goo.gl/maps/EvXBppMYrvq86wkp7">https://goo.gl/maps/EvXBppMYrvq86wkp7</a> acessado em 16/07/2019>.....	55
Figura 21 - Distância em km do sítio do IAG até a estação meteorológica da Estação Pinheiros da Rede Telemétrica da CETESB. Fonte: Google Maps <a href="https://goo.gl/maps/E2hixPjqyLQrLHVp8">https://goo.gl/maps/E2hixPjqyLQrLHVp8</a> acessado em 18/07/2019 .....	57
Figura 22 - Série temporal das concentrações de CO <sub>2</sub> em ambos os sítios desde o início da coleta, que data de 2013 para o sítio do IAG e 2016 para o SPJ. Os dados das concentrações encontram-se em ppm e foram ajustadas em médias horárias. ....	60
Figura 23 - Linha de tendência (linha contínua) das concentrações de CO <sub>2</sub> ao longo dos anos (barras em cinza representam o início e o fim dos anos ímpares). Os pontos	

representam as médias mensais das concentrações em ambos os sítios. E o sombreado, representa o intervalo de confiança de 95% entre a variabilidade dos dados.....	61
Figura 24 - Série temporal das concentrações de CO <sub>2</sub> em ambos os sítios para o ano de 2019.Os dados das concentrações encontram-se em ppm e foram ajustadas em médias por minuto.....	63
Figura 25 - Linha de tendência (linha contínua) das concentrações de CO <sub>2</sub> no ano de 2019. Os pontos representam as médias mensais. E o sombreado, representa o intervalo de confiança de 95% para o ajuste da variabilidade dos dados.....	64
Figura 26 - Variações das concentrações de CO <sub>2</sub> horárias para os dias da semana, para o perfil horário do dia e a variação mensal, para ambos os sítios (em ppm) .....	67
Figura 27 - Frequência, direção e velocidade do vento para os sítios do IAG (à esquerda) e SPJ (à direita), dividida por estação do ano.....	70
Figura 28 - Direção, frequência e concentrações de CO <sub>2</sub> atribuídas a cada sítio de coleta ao longo do ano de 2019. As concentrações de CO <sub>2</sub> encontram-se em ppm e foram divididas por cada estação do ano. ....	71
Figura 29 - Correlação horária da velocidade do vento (em m s <sup>-1</sup> ) versus a concentração de CO <sub>2</sub> no sítio do IAG (para todos os dados do ano de 2019).....	72
Figura 30 - Linhas de tendências das concentrações de CO <sub>2</sub> (em ppm) em ambos os sítios e as linhas de tendência da temperatura (em °C) medidas em ambos os sítios de coleta, para o ano de 2019.....	75
Figura 31 - Correlação horária entre as concentrações de CO <sub>2</sub> (em ppm) medidas no SPJ e a temperatura (em °C), com um nível de significância de $p < 0,0002$ .....	76
Figura 32 - Gráfico de dispersão de CO <sub>2</sub> (em ppm) medido no SPJ e da temperatura (em °C) medida na estação da CETESB em Pinheiros. A inclinação da reta mostra a tendência da correlação e o sombreado o nível de significância de 95%.....	77
Figura 33 - Correlação horária entre as concentrações de CO <sub>2</sub> (em ppm) medidas no sítio do IAG e a temperatura (em °C). Com um nível de significância $p < 0,001$ .....	78
Figura 34 - Concentrações médias horárias de CO <sub>2</sub> (em ppm), por dia do ano em que se realizou a coleta de dados para o sítio do IAG .....	79
Figura 35 - Série temporal do CO <sub>2</sub> (em ppm) dispostos em médias diárias de concentração e em verde os acumulados diários de precipitação (em mm).....	80
Figura 36 - Concentrações diárias de CO <sub>2</sub> e os acumulados de precipitação para o sítio do IAG entre os meses de outubro a dezembro. ....	81

Figura 37 - Variações das concentrações de CO <sub>2</sub> coletadas no sítio do IAG e a concentração de CO (em vermelho) medida na estação Pinheiros pela CETESB, para o ano de 2019. Ambas as concentrações se encontram em ppm.....	83
Figura 38 - Linha de tendência das concentrações de CO <sub>2</sub> medidas no IAG e das concentrações de CO medidas na Estação de Qualidade do ar de Pinheiros. ....	83
Figura 39 - Variação horária, diária, semanal e mensal do CO (em ppm) .....	84
Figura 40 - Frequência e direção do vento para cada concentração de CO <sub>2</sub> , perfilados para cada intervalo de concentração de CO em ppm.....	85
Figura 41 - Gráfico de dispersão de CO versus CO <sub>2</sub> . A linha representa correlação linear entre o CO e o CO <sub>2</sub> . O sombreado indica o nível de significância de 95%. ....	86
Figura 42 - Correlação horária entre o CO e o CO <sub>2</sub> para o sítio do IAG .....	87
Figura 43 – Valores de inclinações das retas de correlações horárias entre o CO <sub>2</sub> e o CO para o sítio do IAG. Onde no eixo y encontram-se os valores de quanto da massa de CO <sub>2</sub> pode ser explicada pela massa de CO mais a adição de uma constante. No eixo x encontram-se os valores referente a cada hora do dia. ....	88
Figura 44 - Inclinações das retas de correlações horárias entre o CO <sub>2</sub> e o CO para o SPJ. Onde no eixo y encontram-se os valores de quanto da massa de CO <sub>2</sub> pode ser explicada pela massa de CO mais a adição de uma constante. No eixo x encontram-se os valores referente a cada hora do dia. ....	88
Figura 45 - Razão do CO (em ppb) pelo CO <sub>2</sub> (em ppm), para o sítio do IAG .....	89
Figura 46 - Evolução do Consumo de combustíveis no estado de São Paulo, em Toneladas equivalente de petróleo (TEP), desde o ano de 2006 até o ano de 2019. (Fonte: <a href="https://cetesb.sp.gov.br/veicular/combustiveis/">https://cetesb.sp.gov.br/veicular/combustiveis/</a> , data de acesso: 01/03/2022) .....	90
Figura 47 - Resultado do teste de normalidade para: <b>a)</b> IAG e <b>b)</b> SPJ.....	105
Figura 48 - Variações das concentrações de CO <sub>2</sub> horárias para os dias da semana, para o perfil horário do dia e a variação mensal, para ambos os sítios (em ppm) - Com os Finais de Semana inclusos.....	106
Figura 49 - Correlação horária da velocidade do vento (em m s <sup>-1</sup> ) e a concentração do CO <sub>2</sub> no SPJ .....	107
Figura 50 - Correlação horária entre as concentrações de CO <sub>2</sub> (em ppm) medidas no sítio do IAG e a temperatura (em °C), para os meses referentes ao verão. ....	107
Figura 51 - Concentrações médias horárias de CO <sub>2</sub> (em ppm), por dia do ano em que se realizou a coleta de dados para o SPJ.....	108
Figura 52 - Correlação horária entre o Co e o CO <sub>2</sub> para o SPJ .....	108

Figura 53 - Inclinações das restas de correlações horárias entre o CO <sub>2</sub> e o CO para o SPJ durante os meses referentes ao verão. Onde no eixo y encontram-se os valores de quanto da massa de CO <sub>2</sub> pode ser explicada pela massa de CO mais a adição de uma constante. No eixo x encontram-se os valores referentes as horas do dia. ....	109
Figura 54 - Variação mensal das concentrações de CO <sub>2</sub> medidas no sitio do IAG no ano de 2013 .....	110
Figura 55 - Variação mensal das concentrações de CO <sub>2</sub> medidas no sitio do IAG no ano de 2014 .....	112
Figura 56- Variação mensal das concentrações de CO <sub>2</sub> medidas no sitio do IAG no ano de 2015 .....	113
Figura 57 - Variação mensal das concentrações de CO <sub>2</sub> medidas no sitio do IAG no ano de 2016 .....	115
Figura 58 - Variação mensal das concentrações de CO <sub>2</sub> medidas no sitio do IAG no ano de 2017 .....	117
Figura 59 - Variação mensal das concentrações de CO <sub>2</sub> medidas no sitio do IAG no ano de 2019 .....	119
Figura 60 - Variação mensal das concentrações de CO <sub>2</sub> medidas no sitio do Pico do Jaraguá no ano de 2016.....	120
Figura 61 - Variação mensal das concentrações de CO <sub>2</sub> medidas no sitio do Pico do Jaraguá no ano de 2017.....	121
Figura 62 - Variação mensal das concentrações de CO <sub>2</sub> medidas no sitio do Pico do Jaraguá no ano de 2019.....	123

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Resultados das concentrações de CO <sub>2</sub> (em ppm), na cidade de Los Angeles durante o ano de 2015 (Verhulst et al., 2017) .....	28
Tabela 2 - Médias mensais e desvio padrão (DP) das concentrações de CO <sub>2</sub> (em ppm) para cada sítio de coleta. Resultados retirados do trabalho (Xueref-Remy et al., 2018) .....	29
Tabela 3 - Concentrações médias do CO <sub>2</sub> (em ppmv), medido na cidade de Miyun, distrito rural de Beijing - China. Valores retirados do trabalho (Wang et al., 2010) .....	30
Tabela 4 - Emissões de CO <sub>2</sub> no país por setor (Fonte: Divulgado pelo MCTIC Publicações das Estimativas Anuais e do 4º Inventário disponíveis em: <a href="https://sirene.mctic.gov.br/portal/opencms/publicacao/index.html">https://sirene.mctic.gov.br/portal/opencms/publicacao/index.html</a> ) .....	33
Tabela 5 - Emissões de CO (em Gg) dos países membros da União Europeia, que forneceram os dados para a elaboração do inventário (European Environment Agency, 2016) .....	41
Tabela 6 - Emissões de CO no país por setor (Fonte: dados divulgados pelo SEEG e encontra-se disponível em <a href="https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission">https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission</a> , data de acesso 01/03/2022).....	42
Tabela 7 - Concentrações do CO <sub>2</sub> médias, mínimas, máximas e o desvio padrão para ambos os sítios, incluindo todos os anos de coleta. As análises foram aplicadas para a média horária dos dados. ....	62
Tabela 8 - Concentrações do CO <sub>2</sub> médias, mínimas, máximas e o desvio padrão para ambos os sítios, no ano de 2019. As análises foram aplicadas para a média por minuto dos dados. ....	65
Tabela 9 - Concentrações médias, máximas, mínimas e desvio padrão de CO <sub>2</sub> (em ppm) em ambos os sítios de coleta, separados por estação do ano. Todos os valores não levam em consideração as concentrações medidas durante os fins de semana.....	73
Tabela 10 - Concentrações médias mensais do CO <sub>2</sub> (em ppm) e o desvio padrão, para ambos os sítios de coleta. Estes valores não levaram em consideração os finais de semana. ....	80
Tabela 11 - Valores de Correlações entre os poluentes e as variáveis meteorológicas medidas em ambos os sítios. Onde a velocidade do vento se encontra em $m s^{-1}$ , a temperatura em °C e o CO e CO <sub>2</sub> em ppm. Todas as correlações apresentaram níveis de significância $p < 0,05$ .....	91

## Lista de abreviaturas e siglas

ALT – Instituto *Alert* no Hemisfério Norte

BM – Brisa Maritímic

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CH<sub>4</sub> – Metano

CLP – Camada limite planetária

CO – Monóxido de Carbono

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

CO<sub>2eq</sub> - Dióxido de Carbono Equivalente

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

COVs – Compostos orgânicos voláteis

DP – Desvio Padrão

FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

FIQ – Faixa interquartil

FFCO<sub>2</sub> - Emissões de CO<sub>2</sub> da combustão de combustíveis fósseis

GEE – Gases de Efeito Estufa

Gg – Gigagrams

GPP – Produção Primária Bruta

CRDS – Espectroscopia de cavidade com varredura de comprimento de onda

IAG – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas

IC – Ilha de Calor

INFLUX – Indianapolis Flux Project

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática

IPPU – Setor de Processos industriais e uso de produtos

LULUCF - Setor do uso da terra, mudança do uso da terra e florestas

MCP<sub>LA</sub> – Projeto *Megacities Carbon*

MCTIC – Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação

NH<sub>3</sub> – Amônia

MLO – Centro de Mauna Loa

MP<sub>2,5</sub> – Material particulado com até 2,5 µm de diâmetro aerodinâmico

NO<sub>x</sub> - óxidos de nitrogênio

O<sub>3</sub> – Ozônio

PEMC – Política Estadual de Mudanças Climáticas de São Paulo

ppb – Partes por Bilhão

ppm – Partes por milhão

RMSP – Região Metropolitana da cidade de São Paulo

SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa

SPJ – Sítio de coleta Pico do Jaraguá

SO<sub>2</sub> – Dióxido de Enxofre

SPO – Estação do Polo Sul

WMO – Organização Meteorológica Mundial

## Sumário

<b>1. Introdução</b>	<b>20</b>
<b>2. Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.1. <i>CO<sub>2</sub></i> .....	24
2.1.1. <i>CO<sub>2</sub></i> e as Mega Cidades .....	27
2.1.2. Inventários de <i>CO<sub>2</sub></i> no Brasil .....	30
2.1.3. <i>CO<sub>2</sub></i> no Estado de São Paulo e na RMSP .....	34
2.1.3.1. <i>CO<sub>2</sub></i> Proveniente da queima de combustíveis fósseis.....	37
2.1.4. <i>CO<sub>2</sub></i> na cidade de São Paulo .....	39
2.2. <i>CO</i> .....	40
2.2.1. <i>CO</i> no Brasil .....	42
2.2.2. <i>CO</i> no Estado de São Paulo e na Região Metropolitana da Grande São Paulo (RMSP).....	43
2.2.3. <i>CO</i> na cidade de São Paulo .....	45
2.3. <i>Acordos Climáticos</i> .....	47
2.3.1. Uma revisão dos acordos climáticos à nível Global.....	47
2.3.2. Uma revisão dos acordos climáticos à nível Nacional .....	48
<b>3. Justificativa</b> .....	<b>50</b>
<b>4. Objetivos</b> .....	<b>50</b>
4.1. <i>Objetivos Específicos</i> .....	50
<b>5. Metodologia</b> .....	<b>52</b>
5.1. <i>Região de Estudo</i> .....	52
5.2. <i>Sítios de coleta</i> .....	53
5.3. <i>Equipamento para monitoramento do CO<sub>2</sub></i> .....	55
5.4. <i>Série temporal dos dados</i> .....	56
5.4.1. <i>CO<sub>2</sub></i> .....	56
5.4.2. <i>CO</i> e <i>PM<sub>2,5</sub></i> .....	56
5.4.3. Meteorológicos .....	56
5.5. <i>Tratamento dos dados</i> .....	57

<b>6. Resultados e Discussões .....</b>	<b>59</b>
6.1. <i>Concentrações de CO<sub>2</sub> desde o início das medições .....</i>	59
6.2. <i>Concentrações do CO<sub>2</sub> para o ano de 2019.....</i>	63
6.2.1. <i>Influência das variáveis meteorológicas nas concentrações de CO<sub>2</sub>.....</i>	69
6.2.1.1. <i>Velocidade e direção do Vento .....</i>	69
6.2.1.2. <i>Correlações entre concentrações de CO<sub>2</sub> e Temperatura .....</i>	74
6.2.1.3. <i>Atuação da precipitação como remoção do CO<sub>2</sub>.....</i>	79
6.3. <i>Concentrações de CO e CO<sub>2</sub>.....</i>	81
6.3.1. <i>Monóxido de carbono .....</i>	82
6.3.2. <i>Correlação CO e CO<sub>2</sub> .....</i>	84
6.3.3. <i>Estudo sobre o transporte de CO<sub>2</sub>.....</i>	90
<b>7. Conclusões.....</b>	<b>92</b>
<b>8. Trabalhos futuros.....</b>	<b>94</b>
<b>9. Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>95</b>
<b>10. Anexos .....</b>	<b>105</b>
10.1. <i>Anexo I.....</i>	105
10.2. <i>Anexo II.....</i>	106
10.3. <i>Anexo III.....</i>	107
10.4. <i>Anexo IV.....</i>	107
10.5. <i>Anexo V .....</i>	108
10.6. <i>Anexo VI.....</i>	108
10.7. <i>Anexo VII.....</i>	109
10.8. <i>Gráficos mensais de CO<sub>2</sub> .....</i>	109
10.8.1. <i>IAG .....</i>	109
10.8.2. <i>Pico do Jaraguá.....</i>	119

## 1. INTRODUÇÃO

Desde o final do século XX, devido à preocupação com as mudanças Climáticas, os Gases de Efeito Estufa (GEE) passaram a ser estudados por diversos países e centros de pesquisa. Medidas diretas ou indiretas mostram um aumento nas suas concentrações, e determinados gases como o Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Metano (CH<sub>4</sub>), Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O) entre outros, têm uma contribuição positiva para aumento da temperatura média do nosso planeta (IPCC, 2021), além dos já estudados riscos para a saúde das pessoas, bem como a fauna e a flora (Brilhante e Caldas, 1999; World Health Organization, 2016).

A preocupação com os efeitos climáticos dos gases de efeito estufa contribuíram para a elaboração de políticas que visassem diminuir as emissões desses gases em todo o globo. Surge através destas políticas o Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática – o IPCC (do acrônimo em inglês, disponível em: <https://www.ipcc.ch/index.htm> - Acessado em: 01/03/2022). O IPCC tornou-se referência para que países elaborem inventários de emissões de gases do efeito estufa, pois apresenta metodologias que visam facilitar tanto a elaboração quanto a possibilidade de comparação entre os diferentes tipos de inventários ao redor do mundo. Segundo Pulles e Heslinga, 2007 o inventário de emissões é uma quantificação de poluentes lançados na atmosfera por diferentes fontes.

No Brasil, o nível de poluição atmosférica é determinado pela quantificação das substâncias poluentes presentes no ar. Conforme a Resolução CONAMA nº 491 de 19/11/2018 (Brasil, 2018), considera-se poluente atmosférico “*qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade*”. Com relação à sua origem, os poluentes podem ser classificados como:

- Primários: aqueles emitidos diretamente pelas fontes de emissão;
- Secundários: aqueles formados na atmosfera através da reação química entre poluentes e/ou constituintes naturais na atmosfera.

Para facilitar a comparação destes poluentes, bem como dos GEE, os inventários de emissão devem seguir uma série de recomendações publicadas pela primeira vez pelo IPCC (IPCC, 1996). Dentre as recomendações está a subdivisão de fontes emissoras por setores, sendo eles:

- **Setor de Energia:** Este setor compreende todas as emissões de poluentes e GEE que são emitidos no processo de geração de energia, seja ele na queima de combustíveis para locomoção ou geração de energia. Estão contidas neste setor as emissões fugitivas de combustíveis e as emissões oriundas de indústrias voltadas para a área da construção civil;

- **Setor de Processos industriais e uso de produtos (IPPU):** Neste setor estão contidas as emissões de todo o setor industrial não envolvidas no processo de geração de energia e/ou construção. São elas: indústria mineral, química, metalúrgica, de uso de solventes, usos não energéticos de combustíveis, eletrônica, entre outras.

- **Setor da Agropecuária:** Neste setor estão contidas as emissões provindas da fermentação entérica; manejo de dejetos animais; cultivo de arroz; solos manejados; queima de resíduos agrícolas; calagem e aplicação de ureia.

- **Setor do uso da terra, mudança do uso da terra e florestas (LULUCF):** neste setor estão contidas todas as emissões e sequestros dos poluentes provenientes de florestas, permanecendo como florestas ou áreas sendo convertidas em florestas; áreas agrícolas e áreas sendo convertidas para a agricultura; campos e pastagens desde os que já eram áreas campestres e pastagens, até áreas convertidas em campos e pastagens; assentamentos; outros tipos de terras que passaram por mudanças e produtos madeireiros.

- **Setor de Resíduos:** neste setor são contempladas as emissões geradas pela disposição de resíduos sólidos; tratamento biológico de resíduos sólidos; incineração e queima a céu aberto de resíduos sólidos e o tratamento e despejo de águas residuais.

Embora os inventários sejam de grande importância para estimar o impacto e a contribuição de diversas fontes de GEE para a atmosfera, estes possuem uma grande incerteza em seus resultados (Ibarra-Espinosa *et al.*, 2018; McKain *et al.*, 2012). Um dos principais problemas causados por essas incertezas é que muitas vezes os inventários de emissões quando utilizados em modelos atmosféricos geram simulações que não correspondem às observações (Pulles e Heslinga, 2007). Uma das justificativas para estas divergências entre os resultados dos inventários e os dados observados pode estar ligada ao processo de criação de inventários de emissões, que acabam gerando algumas incertezas devido ao tipo de metodologia aplicada para a elaboração destes documentos (Gately e Hutyra, 2017). Para considerar as incertezas nos inventários de emissões, é necessário separar as incertezas em dois grupos distintos, sendo o primeiro referente às incertezas nas estimativas de emissões totais, que também são conhecidas

como incertezas de magnitudes (Gately e Hutyra, 2017; Turnbull *et al.*, 2019). Já a segunda incerteza se dá por conta da distribuição espacial e/ou temporal das emissões no domínio do inventário, podendo ser também conhecido como incertezas de “redução de escala”, “desagregação” e/ou “representação” (Gately e Hutyra, 2017). É um desafio estimar diretamente as incertezas de magnitude para inventários “bottom-up<sup>1</sup>”, pois os dados subjacentes normalmente estão disponíveis apenas em algumas fontes, geralmente agências governamentais, e as estimativas de incerteza para esses conjuntos de dados raramente são relatadas (Gately e Hutyra, 2017).

Segundo (Gately e Hutyra, 2017), os inventários de emissões em nível de cidade e estado raramente relatam a distribuição espacial de emissões dentro do domínio, pois normalmente são projetados para fornecer totais de emissões agregados para apoiar a análise de tendências e os requisitos do relatório. No entanto, entender os padrões espaciais de emissões dentro de uma cidade e como essas emissões se correlacionam com outras variáveis, como densidades de construção, população e estradas, fornece informações importantes sobre os processos que impulsionam os padrões de emissões. Uma melhor compreensão desses processos é vital para projetar políticas eficazes de mitigação de emissões em escalas urbanas e estaduais (Gately e Hutyra, 2017). Para reduzir os problemas de incertezas que são encontradas nos inventários foi recomendado por Duren & Miller, 2012, o desenvolvimento de sistemas de observações que sejam projetados para monitorar domos de dióxido de carbono em megacidades que devem incluir um conjunto de sensores de superfície, aéreos e de satélite.

A quantificação detalhada das emissões – em todas as escalas espaciais de cidade à nacional – são necessárias para uma elaboração adequada de projetos, implementações de medidas assertivas e avaliações de políticas de mitigação de emissões em uma ampla gama de escalas administrativas (seja ela municipal, estadual, regional e nacional) (Ciais *et al.*, 2014; Gately e Hutyra, 2017; Gurney *et al.*, 2015). Mais de 7000 cidades, representando 681.179.900 pessoas em todo o mundo, assinaram compromissos para reduzir suas emissões de gases de efeito estufa e criar inventários robustos de suas emissões (Global Covenant of Mayors for Climate & Energy, 2018). Ter estimativas de emissões específicas do setor é vital, pois os governos estaduais e locais podem preferir se concentrar em setores específicos onde as

---

<sup>1</sup> Abordagem Setorial: são utilizadas informações sobre o consumo de combustíveis por setor energético, e então multiplicado pelos fatores de emissão correspondentes, para assim determinar a emissões totais dos GEE por setor.

reduções de emissões podem ser exigidas por políticas locais, mais fáceis de alcançar ou mais econômicas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1.CO<sub>2</sub>

A principal fase do ciclo global do carbono se encontra na concentração de dióxido de carbono presente na atmosfera, sendo este ciclo controlado por uma série distinta de reservatórios de carbono espalhados por todo o planeta (Ciais, Philippe. *et al.*, 2013). Estes reservatórios podem ser subdivididos em dois grupos com características de fluxos diferentes. Sendo o primeiro controlado por grandes fluxos de troca de carbono considerados relativamente rápidos, como por exemplo o carbono contido na atmosfera, nos oceanos em sedimentos superficiais e na terra estão contidos nas vegetações, solos e na água doce (Ciais, Philippe. *et al.*, 2013). Os tempos de troca das concentrações de CO<sub>2</sub> entre os reservatórios, pode ser definido como a massa do reservatório de carbono dividida pelo fluxo de troca, onde o tempo que leva para estas trocas ocorrerem podem variar de alguns anos - para os fluxos da atmosfera - até décadas e/ou milênios - para os principais reservatórios de carbono contidos nas vegetações terrestres, nos solos e nos vários domínios presentes no oceano. Existe também um segundo grupo de reservatórios de carbono com características de fluxos considerados “lento”. Este segundo grupo consiste nos enormes estoques de carbono presentes em rochas e sedimentos. Importante lembrar que, mesmo dentro deste segundo grupo, existem as trocas de carbono de forma rápida que podem acontecer através de emissões vulcânicas, intemperismo químico, erosão e formação de sedimentos no fundo do mar (Ciais *et al.*, 2013; Sundquist, 1986). Já os tempos de troca de carbono dos reservatórios (principalmente geológicos) do domínio lento são da ordem de 10.000 anos ou mais. Os fluxos de troca natural entre o domínio lento e rápido do ciclo do carbono são relativamente pequenos (menores que 0,3 PgC ano<sup>-1</sup>, sendo 1 PgC = 10<sup>15</sup> g C) e podem ser assumidos como aproximadamente constantes no tempo nos últimos séculos, embora a erosão e os fluxos dos rios possam ter sido modificados por mudanças induzidas pelo homem no uso da terra (Ciais *et al.*, 2013; Raymond e Cole, 2003).

Uma característica dos fluxos rápidos de troca de carbono é que durante o Holoceno, que data de ter começado há aproximadamente 11.700 anos atrás, até momentos antes do início da Era Industrial, a magnitude dos fluxos rápidos eram aproximadamente constantes e estacionários. Ciais et al. 2013 evidencia isto ao analisar estudos em testemunhos de gelo, que mostraram variações relativamente pequenas de CO<sub>2</sub> atmosférico registradas nos núcleos de gelo, apesar das pequenas variações nas emissões causadas pelo homem devido às mudanças uso da terra nos últimos milênios(Canadell *et al.*, 2021; Ciais *et al.*, 2013; Pongratz *et al.*, 2009).

Em contraste, desde o início da Era Industrial, a extração de combustível fóssil de reservatórios geológicos e sua combustão resultou na transferência de uma quantidade significativa de carbono fóssil dos reservatórios de fluxos lentos para os de fluxos rápidos, causando, assim, uma grande e inédita perturbação induzida no ciclo do carbono. (Ciais *et al.*, 2013). Com um nível de confiança muito alto, a queima de combustíveis fósseis e aquelas decorrentes da mudança do uso do solo são a causa dominante do aumento observado na concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico (Canadell *et al.*, 2021; Ciais *et al.*, 2013). Ainda segundo Ciais *et al.*, 2013, na década de 2002 até 2011 a taxa de aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico ocorreu com a média de  $2,0 \pm 0,1$  ppm ano<sup>-1</sup>, sendo esta taxa a maior já registrada, desde quando as medições diretas da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera começaram (~1958). Já para a década seguinte (2010 – 2020) a média das emissões de CO<sub>2</sub> pelas atividades humanas, foi de  $10,9 \pm 0,9$  PgC ano<sup>-1</sup>, sendo distribuídas nos três componentes do sistema terrestre, onde 46% do total das emissões foram acumuladas na atmosfera ( $5,1 \pm 0,02$  PgC ano<sup>-1</sup>), 23% das emissões foram absorvidas pelos oceanos ( $2,5 \pm 0,6$  PgC ano<sup>-1</sup>) e cerca de 31%, foi armazenada pela vegetação em ecossistemas terrestres ( $3,4 \pm 0,9$  PgC ano<sup>-1</sup>) (Canadell *et al.*, 2021). Do total de emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub>, a combustão de combustíveis fósseis foi responsável por cerca de 81 à 91%, com o restante das emissões sendo o fluxo líquido de CO<sub>2</sub> provenientes da mudança no uso da terra e manejo da terra (Canadell *et al.*, 2021).

O CO<sub>2</sub> pode ser removido da atmosfera pela fotossíntese das plantas, sendo este fluxo também conhecido como Produção Primária Bruta (GPP) (Beer *et al.*, 2010). O GPP terrestre é o maior fluxo global de carbono e impulsiona várias funções do ecossistema, como respiração e crescimento, contribuindo assim, para o bem-estar humano porque é a base para a produção de alimentos, fibras e madeira (Beer *et al.*, 2010). Além disso, o GPP, juntamente com a respiração, é um dos principais processos que controlam a troca de CO<sub>2</sub> entre a superfície e a atmosfera, fornecendo a capacidade dos ecossistemas terrestres de compensarem parcialmente as emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub> (Beer *et al.*, 2010). Como a absorção de CO<sub>2</sub> pela fotossíntese ocorre apenas durante a estação de crescimento, enquanto a liberação de CO<sub>2</sub> pela respiração ocorre quase o ano todo, a maior massa de terra no Hemisfério Norte confere um ciclo sazonal característico de 'dente de serra' na variação das concentrações do CO<sub>2</sub> atmosférico, como pode ser observado na Figura 1 (Ciais, Philippe. *et al.*, 2013; Keeling *et al.*, 2001).

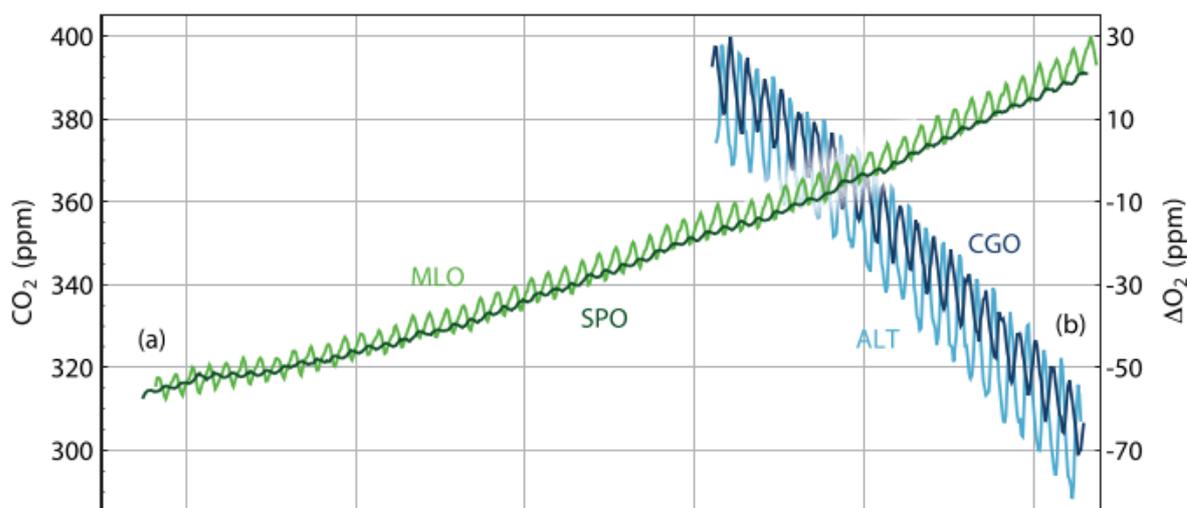


Figura 1 - Concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> e Oxigênio registrada nas últimas décadas em estações representativas, onde: a) CO<sub>2</sub> medido no centro de Mauna Loa (MLO), no Hemisfério Norte e na estação atmosférica no Polo Sul (SPO). b) O<sub>2</sub> medido nas estações Alert no Hemisfério Norte (ALT) e na estação de Cabo Grim, no Hemisfério Sul (CGO). Esta Figura foi retirada do capítulo 5 do quinto relatório do IPCC (Ciais *et al.*, 2013).

O carbono fixado nas plantas é então reciclado através dos tecidos vegetais, serapilheira e carbono do solo, podendo ser liberado de volta para a atmosfera por respiração autotrófica (planta) e heterotrófica (microbiana do solo e animal), além de processos de perturbação adicionais como por exemplo, incêndios esporádicos (Beer *et al.*, 2010). Uma quantidade significativa de carbono terrestre (cerca de 1,7 PgC ano<sup>-1</sup>) é transportada dos solos para as nascentes dos rios (Tranvik *et al.*, 2009). Sendo assim, uma fração desse carbono é liberada como CO<sub>2</sub> por rios e lagos para a atmosfera, outra fração é enterrada em sedimentos orgânicos de água doce e a quantidade restante (aproximadamente 0,9 PgC ano<sup>-1</sup>) é entregue pelos rios ao oceano costeiro (Tranvik *et al.*, 2009). Estes processos de retirada do CO<sub>2</sub> da atmosfera também são chamados de sumidouros. Globalmente, o tamanho dos sumidouros naturais de CO<sub>2</sub> combinados entre os presentes na terra e nos oceanos seguiu aproximadamente a taxa atmosférica de aumento, removendo 55% das emissões antrópicas totais a cada ano, em média, durante 1958–2011 (Tranvik *et al.*, 2009).

Globalmente, os crescimentos econômico e populacional continuam sendo os mais importantes impulsionadores do aumento das emissões de CO<sub>2</sub> da combustão de combustíveis fósseis (FFCO<sub>2</sub> – do acrônimo em Inglês)(IPCC, 2021). As áreas urbanas compreendem apenas 3% da área de superfície da Terra, mas respondem por ~70% das emissões globais de dióxido de carbono derivadas de combustíveis fósseis (Duren e Miller, 2012; Nations *et al.*, 2018). Quase metade dos habitantes urbanos do mundo reside em assentamentos relativamente

pequenos, menores que 500.000 habitantes, enquanto cerca de um em cada oito vive em 33 megacidades com mais de 10 milhões de habitantes (Nations *et al.*, 2018).

### 2.1.1. CO<sub>2</sub> e as Mega Cidades

As megacidades (áreas metropolitanas com população superior a 10 milhões) apresentam um grande desafio ambiental em todo o globo (IPCC, 2014; Molina, 2021). O rápido crescimento populacional, somado ao desenvolvimento urbano insustentável e o aumento da demanda de energia por transporte, atividades industriais, comerciais e residenciais levaram a grandes quantidades de emissões de diversos poluentes para a atmosfera sujeitando os moradores locais a diversos riscos a sua saúde. As atividades antrópicas presentes nas megacidades são responsáveis pelas emissões de poluentes primários, incluindo espécies gasosas como compostos orgânicos voláteis (COVs), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), amônia (NH<sub>3</sub>), alguns dos quais contribuem para a formação de poluentes secundários como o ozônio (O<sub>3</sub>) e material particulado fino (MP<sub>2,5</sub>)<sup>2</sup> (por exemplo, fuligem de combustão, poeira) (Molina, 2021).

Em muitas megacidades e grandes centros urbanos ao redor do mundo, as emissões do setor de transporte são uma importante fonte de poluição do ar (Molina, 2021; Verhulst *et al.*, 2017; Xueref-Remy *et al.*, 2018). As contribuições das emissões de fontes móveis podem variar muito entre as megacidades, dependendo das características técnicas da frota veicular, da qualidade dos combustíveis consumidos, do nível de desenvolvimento local e da intensidade das atividades econômicas e do volume de viagens veiculares (Molina, 2021).

A fim de entender melhor a contribuição das megacidades e dos grandes centros urbanos para as emissões de poluentes, bem como sua variabilidade anual e sazonal, alguns grandes centros de pesquisa desenvolveram projetos que apresentaram resultados bastante pertinentes com esta pesquisa. Como por exemplo, o projeto *Megacities Carbon Project* (MCP<sub>LA</sub>), da cidade de Los Angeles (Duren e Miller, 2012; Verhulst *et al.*, 2017). A rede de monitoramento de gases de efeito estufa da megacidade de Los Angeles utiliza instrumentos de espectroscopia de cavidade com varredura de comprimento de onda (CRDS – do acrônimo em inglês) (Picarro Inc., séries G2301 e G2401) – sendo que todos os instrumentos CRDS medem CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e vapor d'água (Verhulst *et al.*, 2017). Todos os resultados analisados neste trabalho, foram

---

<sup>2</sup> Material particulado com diâmetro menor ou igual a 2,5 micrometros, também conhecidos como partículas inaláveis finas

elaborados com a média horária das concentrações do gás coletados em todos os sítios. Os resultados obtidos no trabalho foram dispostos na Tabela 1 e mostram grandes variabilidades entre os sítios de coleta, ainda mais quando comparados os sítios urbanos (GRA, USC, FUL, COM e IRV), com os sítios mais afastados da região metropolitana, considerados pelos autores como sítios de *background* (LJO, SCI e VIC). Foi ressaltado pelos autores que as maiores concentrações de CO<sub>2</sub> medidas nos sítios urbanos, foram registradas durante a estação de inverno, e que as menores concentrações foram registradas no período do verão. Ainda segundo Verhulst *et al.*, 2017 os picos de alta concentração podem, geralmente, ocorrer à noite e/ou no início da manhã, quando a atmosfera é mais estável e quando os locais são mais sensíveis às fontes próximas. Além destes destaques, os autores reforçaram a correlação inversamente proporcional da velocidade do vento com as concentrações nos sítios. Sendo que as menores velocidades do vento estão correlacionadas com as maiores concentrações, e vice-versa.

Tabela 1- Resultados das concentrações de CO<sub>2</sub> (em ppm), na cidade de Los Angeles durante o ano de 2015 (Verhulst *et al.*, 2017)

<b>Medidas horárias totais</b>					
<b>Sítios Urbanos</b>	Média	Mínimo	Mediana	Máxima	Desvio padrão
<b>GRA</b>	421,4	399,0	416,3	532,6	17,0
<b>USC</b>	434,8	397,5	424,4	621,8	31,2
<b>FUL</b>	429,0	398,1	421,3	572,9	23,3
<b>COM</b>	430,5	395,9	419,5	625,8	30,3
<b>IRV</b>	419,4	392,6	413,0	531,9	19,3
<b>Medidas filtradas apenas para o intervalo das 12 às 16:00 (Horário Local LA)</b>					
<b>GRA</b>	414,6	399,2	411,2	521,6	12,8
<b>USC</b>	421,6	397,5	416,5	530,0	17,5
<b>FUL</b>	418,6	398,7	414,4	498,8	14,9
<b>COM</b>	418,0	396,9	412,9	558,1	16,9
<b>IRV</b>	412,0	392,6	408,2	494,9	13,5
<b>Medidas horárias totais</b>					
<b>Sítios de Background</b>	Média	Mínimo	Mediana	Máxima	Desvio padrão
<b>LJO</b>	412,9	388,8	407,3	498,2	14,9
<b>SCI</b>	402,4	390,7	403,1	427,7	4,3
<b>VIC</b>	404,7	393,5	404,4	442,6	3,7
<b>Medidas filtradas apenas para o intervalo das 12 às 16:00 (Horário Local LA)</b>					
<b>LJO</b>	407,6	392,5	405,1	468,1	10,6
<b>SCI</b>	402,4	391,2	403,1	425,2	4,4
<b>VIC</b>	404,4	395,9	404,0	442,6	3,6

Outro projeto que surgiu com o mesmo propósito do MCP<sub>LA</sub>, porém, para a cidade de Indianapolis, localizada no estado de Indiana, nos Estados Unidos, é conhecido como *INFLUX* (do inglês: “*Indianapolis Flux Project*”) (Turnbull *et al.*, 2015, 2019). A metodologia adotada

no projeto possui uma abordagem diferente; os resultados obtidos foram apresentados em frações molares, no entanto, ressaltou-se a alta correlação do CO<sub>2</sub> com o CO na estimativa de emissões do CO<sub>2</sub> proveniente da combustão de combustível fóssil (Gurney *et al.*, 2009; Turnbull *et al.*, 2015, 2019). Outro resultado discutido em Turnbull *et al.*, 2019 que está em linha com o abordado nas discussões do MCP<sub>LA</sub>, quando as maiores concentrações do CO<sub>2</sub> foram encontrados durante o período de maior atividade do tráfego de veículos

O último projeto que será destacado nesta revisão foi elaborado na cidade de Paris. Batizado com o nome de *CO<sub>2</sub>-Megaparis* (Xueref-Remy *et al.*, 2018), o projeto utilizou os mesmos equipamentos de medição descritos no grupo de pesquisa MCP<sub>LA</sub>. Também apresentou padrões de correlações inversamente proporcionais à velocidade do vento, para sítios de coleta urbanos (EIF, GON). Os valores médios e o desvio padrão foram calculados para concentrações coletadas durante o período de 8 de agosto de 2010 até 13 de julho de 2011, e podem ser observados na tabela 2. Importante ressaltar que os dados apresentados no trabalho foram relativamente inferiores e com menores variações nas concentrações que os apresentados por Verhulst *et al.*, 2017. Este fato, segundo Xueref-Remy *et al.*, 2018, está ligado ao fato de que as concentrações de CO<sub>2</sub> na cidade de Paris, não sofrem tanta influência do tráfego de veículos como os estudos MCP<sub>LA</sub> demonstraram ter.

Tabela 2 - Médias mensais e desvio padrão (DP) das concentrações de CO<sub>2</sub> (em ppm) para cada sitio de coleta.

Resultados retirados do trabalho (Xueref-Remy *et al.*, 2018)

	MON	DP	GON	DP	EIF	DP	GIF	DP	TRN50	DP	TRN180	DP	MHD	DP
<b>Primavera Boreal</b>														
<b>Março</b>	410,4	9,4	420,3	19,1	411,8	16,7	414,4	13,7	408,9	9,3	405,5	7,9	398,6	4,4
<b>Abril</b>	402,1	11,0	421,2	32,6	403,0	13,2	408,7	15,3	401,3	11,2	396,8	7,1	398,6	4,9
<b>Mai</b>	394,7	8,9	405,5	20,0	398,0	10,6	398,7	11,2	395,0	9,9	391,2	5,9	396,3	2,4
<b>Verão Boreal</b>														
<b>Junho</b>	400,1	11,9	406,2	27,3	396,9	8,2	400,9	12,8	398,4	10,7	394,5	4,7	394,5	3,5
<b>Julho</b>	393,1	6,9	398,6	17,3	393,4	6,6	397,2	8,3	392,4	6,2	389,8	3,2	392,1	5,0
<b>Agosto</b>	390,8	10,2	401,9	29,6	387,1	29,6	392,2	11,8	389,8	10,8	384,9	5,6	381,4	2,5
<b>Outono Boreal</b>														
<b>Setembro</b>	395,3	12,7	410,9	34,0	391,0	11,1	395,3	11,1	392,5	11,8	385,7	5,7	384,0	3,3
<b>Outubro</b>	402,8	9,8	413,9	24,7	400,8	12,0	403,0	11,3	400,3	10,6	395,0	7,2	390,9	6,2
<b>Novembro</b>	408,3	10,4	414,9	15,9	407,7	15,1	411,2	12,9	401,8	9,4	399,3	8,6	393,6	3,8
<b>Inverno Boreal</b>														
<b>Dezembro</b>	417,0	13,9	424,5	17,9	414,2	16,9	415,4	13,9	408,3	9,5	406,3	10,4	396,8	3,8
<b>Janeiro</b>	408,9	9,4	415,8	16,7	408,4	13,2	410,1	13,0	405,7	10,1	403,1	9,3	396,1	2,3
<b>Fevereiro</b>	411,9	12,2	423,1	20,7	410,5	14,7	409,8	10,5	405,4	7,8	402,8	7,3	396,3	2,0

Trabalhos como o publicado por Wang *et al.*, 2010, estudaram as concentrações de CO<sub>2</sub> presentes em uma área rural de Beijing, na China. Embora o trabalho tenha usado uma

metodologia diferente dos trabalhos citados acima, os resultados obtidos pelos autores merecem o destaque nesta revisão bibliográfica. Wang *et al.*, 2010, estudaram as concentrações do CO<sub>2</sub> entre os anos de 2005 e 2008, onde foi possível identificar o mesmo padrão sazonal de concentração do poluente, sendo os maiores valores registrados durante os meses referentes ao outono e inverno do Hemisfério Norte, e os menores valores ligados aos meses da primavera e verão boreal. Os resultados encontrados estão disponíveis na Tabela 3. Outro fator que foi discutido pelo autor foi a correlação entre CO e CO<sub>2</sub> para traçar as fontes de emissão do CO<sub>2</sub> oriundas da combustão. Segundo os autores a maior taxa de correlação foi registrada durante o inverno (23 ppmv/ppmv), com um coeficiente de correlação de 0,6.

*Tabela 3 - Concentrações médias do CO<sub>2</sub> (em ppmv), medido na cidade de Miyun, distrito rural de Beijing - China. Valores retirados do trabalho (Wang et al., 2010)*

	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>
<b>Média</b>	392.17	397.02	399.62	400.35
<b>Mediana</b>	389.31	394.89	396.17	397.59
<b>Mínimo</b>	350.75	349.30	343.66	352.57
<b>Máximo</b>	478.21	481.59	488.77	467.92

### **2.1.2. Inventários de CO<sub>2</sub> no Brasil**

Utilizando as mesmas premissas que grande parte dos inventários desenvolvidos em outros países, o Brasil, possui um inventário de emissão dos GEE, separados por setor agrupado, como o discutido no tópico 1.3. O último relatório disponibilizado pelo MCTIC data de 2021 (Brasil, 2021). Para o nosso país como um todo, lidera o ranking de maiores emissores de GEE, os setores da agropecuária com uma representatividade de 33,2% de todos os gases inventariados. Em segundo lugar ficou o setor de Energia, com 28,9% seguido pelo setor de mudanças do uso do solo (LULUCF), com 27,1% do total de GEE emitidos no Brasil (Figura 2)

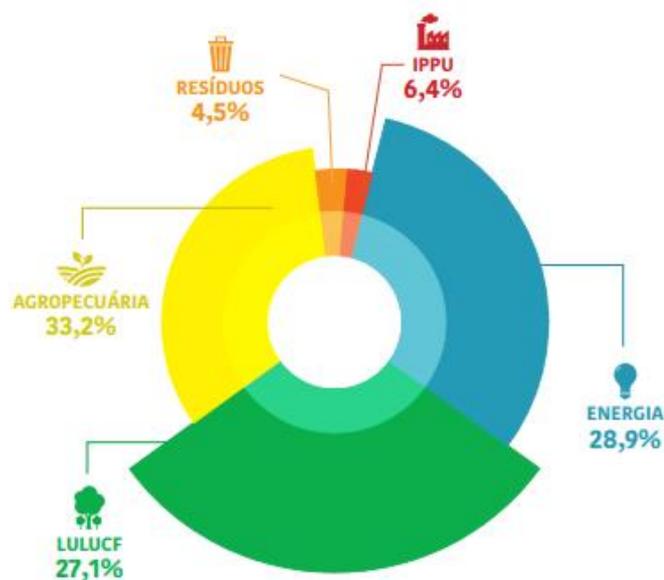


Figura 2 - Emissões de GEE no Brasil por Setor em 2016. Totais estimadas por CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2eq</sub>). (Imagem retirada do livro: Resultados de Inventários de Emissões de Gases do Efeito Estufa por Unidade Federativa, criado pelo MCTIC (Brasil, 2021).

Os valores totais de emissão dos GEE, para o Brasil, podem ser observados na Figura 3, onde o MCTIC apresentou os totais estimados desde o ano de 1990 até 2016. Destaca-se que houve uma redução nas emissões totais do setor de mudança do uso do solo a partir de 2005, porém, é importante ressaltar que as incertezas das emissões dos GEE para este subsetor foram maiores que para qualquer outro subsetor como apresentado no Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções antrópicas de Gases de Efeito Estufa, divulgado pelo MCTIC no ano de 2021 (MCTIC, 2021).

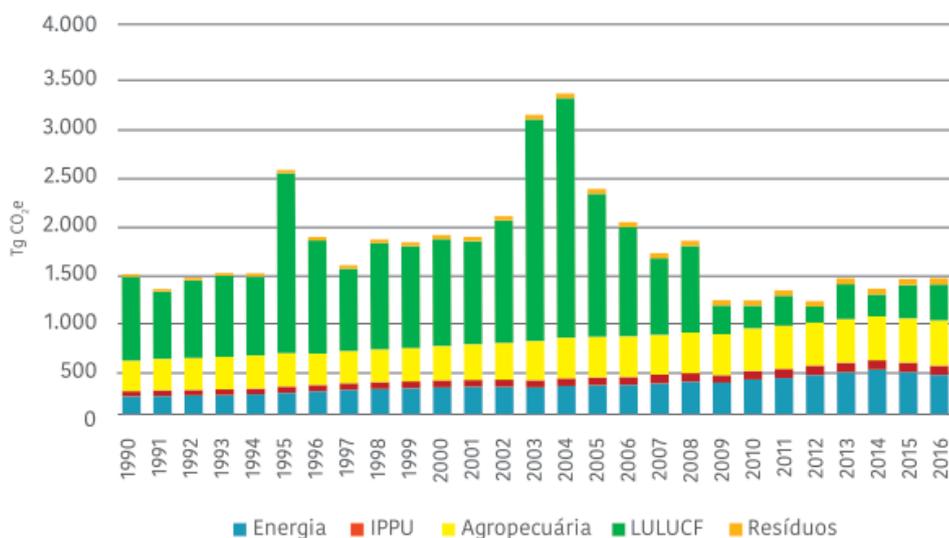


Figura 3 - Série histórica de emissões e remoções de GEE do Brasil (Brasil, 2021)

Para todos os gases inventariados, o CO<sub>2</sub> foi o gás que apresentou as maiores emissões em todos os setores analisados, totalizando um montante de 873.272 Gg de CO<sub>2eq</sub>, que representam 59,5% de todos os GEE estimados no relatório. As emissões de GEE totais para o setor da agropecuária no ano de 2016, foi da ordem de 487,0 Tg CO<sub>2eq</sub>, representando um aumento de 6,3%, se comparado com a emissão do mesmo setor para o ano de 2010. Já o setor LULUCF, apresentou a maior taxa de aumento de emissão dos GEE para o de 2016 (57,4%), quando comparado ao ano de 2010. Abaixo encontra-se a tabela com as emissões totais dos GEE em função do CO<sub>2eq</sub>, nota-se que para todos os setores inventariados houve um aumento em relação a emissão dos gases entre os anos 2010 e 2016.

SETOR	1990	1995	2000	2005	2010	2016	VARIAÇÃO 2010-2016
	Tg CO <sub>2</sub> e						%
1. Energia	192,8	231,0	288,2	313,4	374,7	423,6	13,1
2. IPPU	53,6	64,0	73,8	78,9	87,1	93,4	7,2
3. Agropecuária	329,5	359,2	370,1	438,0	458,1	487,0	6,3
4. LULUCF	907,5	1.966,8	1.175,0	1.564,1	252,5	397,4	57,4
5. Resíduos	26,2	34,3	42,6	51,6	56,7	66,0	16,4
<b>TOTAL</b>	<b>1.509,6</b>	<b>2.655,2</b>	<b>1.949,6</b>	<b>2.445,9</b>	<b>1.229,0</b>	<b>1.467,3</b>	<b>19,4</b>

Figura 4 - Emissões totais de GEE para o Brasil, entre os anos de 1990 até 2016, divulgados no Quarto inventário nacional de emissões de GEE (MCTIC, 2021)

Segundo o relatório nacional de emissões de GEE (Brasil, 2021b), os setores que foram responsáveis pelas maiores emissões de CO<sub>2eq</sub>, foram os da Energia (46,0% no ano de 2016), por contemplar o uso energético de queima de combustíveis fósseis, e o setor de mudança de uso do solo (41,8%). Sendo que, as emissões de CO<sub>2eq</sub> referentes ao setor de energia, apresentaram um aumento de 13,8% quando comparados as emissões do setor no ano de 2010, destacando que somente a categoria de transporte (considerando todos os modais da categoria), foram responsáveis por 22,9% das emissões nacionais de CO<sub>2</sub> por CO<sub>2eq</sub> no ano de 2016. Os valores de CO<sub>2</sub> utilizados pelo MCTIC neste inventário podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 - Emissões de CO<sub>2</sub> no país por setor (Fonte: Divulgado pelo MCTIC Publicações das Estimativas Anuais e do 4º Inventário disponíveis em: <https://sirene.mctic.gov.br/portal/opencms/publicacao/index.html>)

<b>CO<sub>2</sub> (Gg)</b>	<b>1. Energia</b>	<b>2. Processos industriais e uso de produtos (IPPU)</b>	<b>3. Agropecuária</b>	<b>4. Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas (LULUCF)</b>	<b>5. Resíduos</b>
2000	272.173	64.506	10.645	1.110.480	926
2001	279.460	62.487	9.908	1.057.520	921
2002	277.150	65.061	11.966	1.257.137	962
2003	269.839	65.828	14.422	2.296.717	919
2004	284.503	67.043	14.330	2.482.398	912
2005	292.351	67.660	9.975	1.479.731	1.108
2006	297.469	67.549	9.925	1.133.831	1.001
2007	310.634	82.971	12.823	793.759	1.054
2008	329.701	80.998	13.533	899.085	1.332
2009	317.026	72.337	11.188	284.056	1.125
2010	352.903	82.049	13.698	220.461	1.154
2011	368.824	88.632	16.827	300.253	1.114
2012	400.894	89.473	18.932	155.421	1.164
2013	432.346	90.395	19.114	354.221	1.230
2014	458.908	87.882	20.271	214.254	1.331
2015	433.397	87.652	17.538	334.796	1.149
2016	401.690	85.943	19.732	365.404	504

No último relatório divulgado pelo Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), foi constatado uma redução nas emissões de CO<sub>2eq</sub> no ano de 2020 devido ao impacto da pandemia de COVID-19, no Brasil, sendo estas reduções tendo correlação direta com a diminuição das emissões de CO<sub>2eq</sub> provenientes do setor de Energia (SEEG, 2021). No entanto, no penúltimo relatório divulgado pelo SEEG, o Brasil registrou um aumento de 9,6% nas emissões brutas de GEE, durante o ano de 2019 (SEEG, 2020). Albuquerque Sant'Anna e Costa, 2021 apontam que desde 2012, com a revisão do código penal ambiental, as taxas de desmatamento da floresta Amazônica vem aumentando a taxas alarmantes até os dias atuais. Já o SEEG, 2020, 2021, destacou que durante a gestão do atual governo, onde foi registrado o desmonte nacional da governança do clima, o país emitiu um total de 2,17 bilhões de toneladas de CO<sub>2eq</sub> para a atmosfera, sendo que no ano de 2018 os

valores totais de emissões foram de 1,98 bilhões de toneladas de CO<sub>2eq</sub>, o que representou um aumento de 1,1% nas emissões nacionais de GEE, como podemos observar na Figura 5.

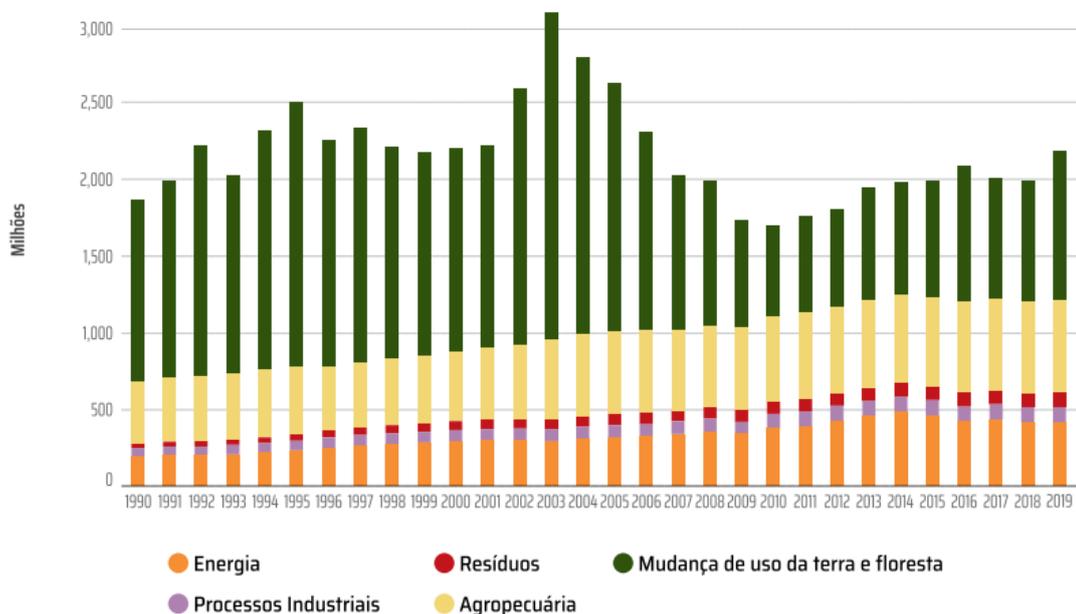


Figura 5 - Emissões de gases de efeito estufa no Brasil, de 1990 a 2019 (em MtCO<sub>2eq</sub>). Figura retirada no relatório de emissões realizado por SEEG, 2020.

### 2.1.3. CO<sub>2</sub> no Estado de São Paulo e na RMSP

O último relatório divulgado pelo MCTIC também apresentou as emissões por regiões e por cada capital dentro destas regiões a fim de identificar as principais fontes de emissões por setor nas diferentes regiões do país. Sendo assim, foi constatado que a região sudeste é a principal emissora de GEE no Brasil, sendo responsável por 26% das emissões nacionais. A região sudeste também contribui para o sequestro de 14.362 Gg de CO<sub>2eq</sub> da atmosfera devido à vegetação presente no estado, porém, também é responsável por emitir 396.903 Gg CO<sub>2eq</sub> de GEE, sendo o setor da energia o maior contribuinte para estes totais de emissões (52% do total das emissões de GEE, por CO<sub>2eq</sub> no Sudeste), seguido pelo setor da agropecuária (25%) e pelo setor de indústrias ou IPPU (16%) (Brasil, 2021).

O estado de São Paulo também foi contabilizado no inventário nacional, sendo responsável pela emissão de 96.631 Gg de CO<sub>2eq</sub>. O estado de São Paulo apresentou um aumento de suas emissões entre os anos de 2010 e 2016 (14%), como pode ser observado na Figura 6, onde a principal causa apontada pelo inventário nacional se deu pela diminuição das remoções de CO<sub>2eq</sub> do setor de LULUCF (Brasil, 2021). Os principais setores responsáveis pelas emissões totais de GEE, no estado de São Paulo, assim como na região sudeste, foram os

setores de energia, que representam um total de 51% das emissões, seguidos pelo setor da agropecuária, onde os solos manejados representaram 47% das emissões (Brasil, 2021).

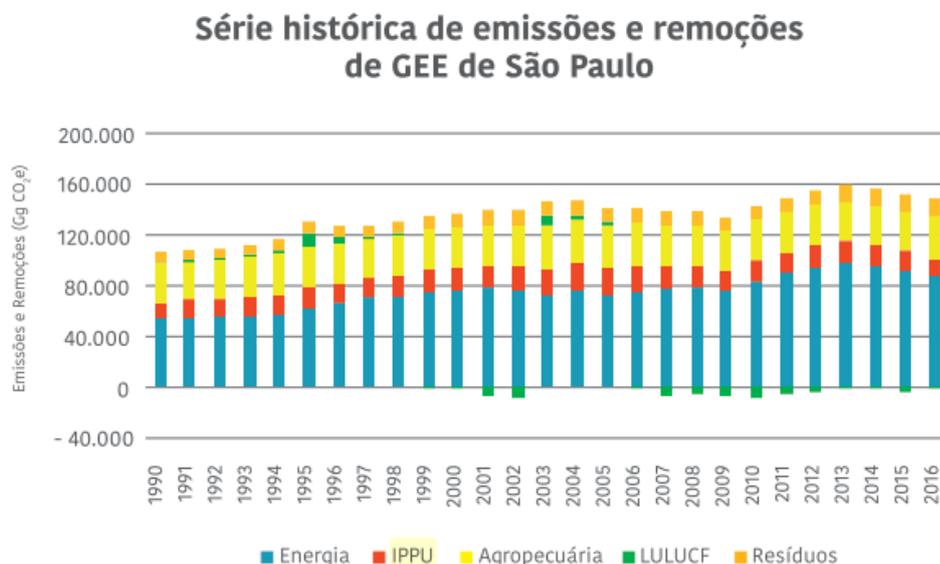


Figura 6 - Série histórica das emissões de CO<sub>2</sub>eq no estado de São Paulo. Gráfico retirado do 4 inventário nacional de emissões de GEE (Brasil, 2021).

A CETESB também divulgou um inventário de emissões de GEE, focado no estado de São Paulo no ano de 2011 (CETESB, 2011). O relatório usou como base as estimativas realizadas no estado de 1990 até 2008, utilizando como metodologia as normas recomendadas pelo IPCC (IPCC, 1996). Os Gases inventariados foram não só os que estavam na lista do Protocolo de Kyoto (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, PFC's, HFC's, SF<sub>6</sub>), mas também os gases regulamentados pelo protocolo de Montreal, responsáveis por destruir a camada de ozônio (CFC's e HCFC's, etc.). O inventário foi definido na época pela Política Estadual de Mudanças Climáticas de São Paulo (PEMC - (São Paulo, 2009))

Assim como para o Brasil, o estado de São Paulo teve o setor de energia como o maior responsável pelas emissões de GEE, representando na época 57,2% das emissões totais, seguidos pelos setores da agropecuária com 21,3% da representatividade das emissões e pelo setor da Indústria ou IPPU, com 14,7% (CETESB, 2011). Na Figura 7, são apresentados os totais das concentrações emitidas do CO<sub>2</sub>, entre os anos de 2005 e 2008, que somaram um total de 92.762 Gg CO<sub>2</sub>eq e 99.034 Gg CO<sub>2</sub>eq, respectivamente. É possível notar um aumento da contribuição no setor de energia e a diminuição da contribuição dos outros setores, quando se compara os anos de 2005 e 2008.

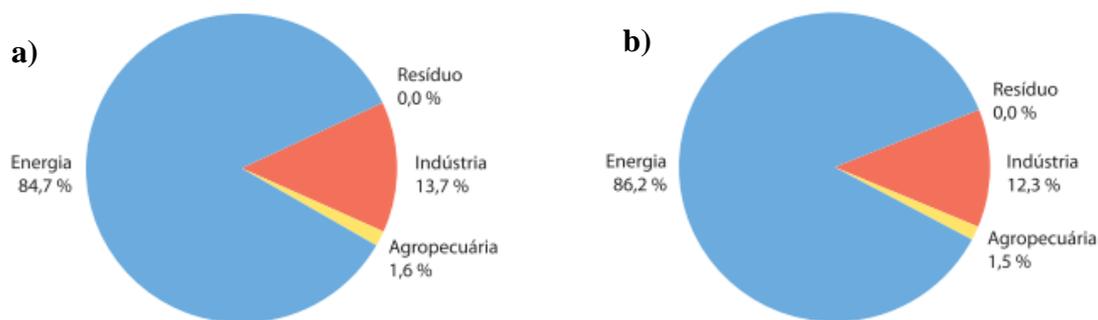


Figura 7 - Emissões de CO<sub>2</sub>eq no estado de São Paulo, onde: a) emissões referentes ao ano de 2005; b) emissões referentes ao ano de 2008. Imagem retirada do 1º Inventário de emissões estaduais (CETESB, 2011).

No ano de 2019, os estados que mais contribuíram para as emissões brutas de GEE no Brasil, foram liderados pelo Pará (representando 18,4% do total das emissões), seguido pelo estado de Mato Grosso, que representou 10,6% das emissões, no entanto, se não for levado em consideração a mudança no uso da terra, o primeiro estado que mais contribuiu para as emissões de GEE passa a ser o estado de São Paulo (6,9% do total bruto de emissões de GEE), seguido pelo estado de Minas Gerais (6,7%) (SEEG, 2020). Ainda segundo o relatório a principal fonte de emissões de CO<sub>2</sub> no estado de São Paulo foram provenientes do setor de energia (principalmente do segmento do Transporte) sendo registrado um total de 73,1 MtCO<sub>2</sub>, como pode ser observado na Figura 8.

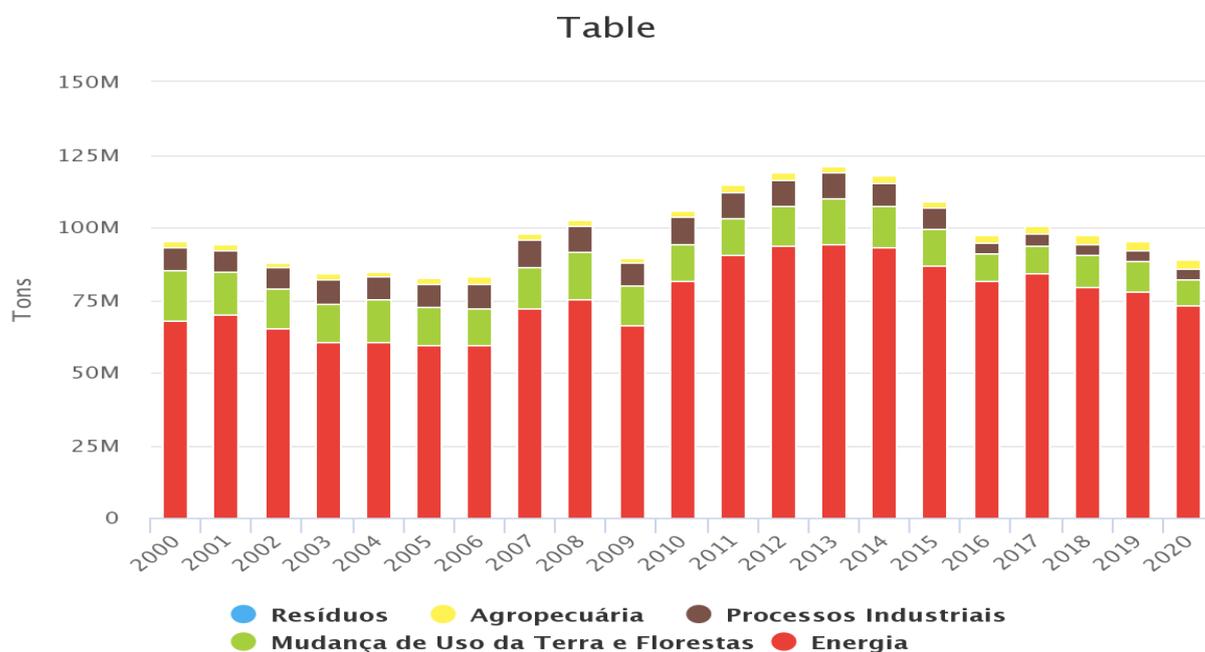


Figura 8 - Emissões de CO<sub>2</sub> em toneladas para o estado de São Paulo, por setor. Gráfico elaborado pelo SEEG e encontra-se disponível em [https://plataforma.seeg.eco.br/total\\_emission](https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission), data de acesso 01/03/2022

### 2.1.3.1. CO<sub>2</sub> Proveniente da queima de combustíveis fósseis

O inventário de emissão divulgado pela CETESB, 2011, contou com um estudo de quanto do CO<sub>2</sub> total emitido pelo setor de energia era proveniente da queima de combustíveis fósseis. Para realização de tal estudo foram empregadas duas metodologias distintas, a primeira considerada como abordagem de referência (“*Top-down*”), que utiliza dados de consumo aparente para realizar as estimativas de emissões de CO<sub>2</sub>. Na segunda foi empregada a abordagem setorial (“*Bottom-up*”), que faz uso dos dados de consumo final para estimar as emissões de CO<sub>2</sub> por setor. Ambos os métodos contemplam apenas as emissões do CO<sub>2</sub> provenientes da queima de combustíveis fósseis, porque consideram as emissões do CO<sub>2</sub> provenientes da queima de biomassa renovável nulas.

Na abordagem de referência as emissões totais de CO<sub>2</sub> apresentaram um aumento entre os anos de 1990 (56.957 Gg<sub>CO<sub>2</sub>eq</sub>), e 2008 (79.231 Gg<sub>CO<sub>2</sub>eq</sub>), o que representou um crescimento de 39%, que refletiu em média um aumento de 1,85% para cada ano da série temporal analisada. Em 2008, dentre as emissões do setor energético, foram os combustíveis derivados do petróleo os maiores responsáveis pelas emissões de CO<sub>2</sub> (78%), seguidos pelas emissões provenientes do gás natural (14%), já a queima de carvão mineral e outros derivados representaram apenas 8% das emissões de CO<sub>2</sub>, dentro do setor energético, daquele ano (CETESB, 2011).

Já na abordagem setorial as emissões totais de CO<sub>2</sub> provenientes da queima de combustíveis fósseis, para o ano de 2008 foram estimadas em 79.690 GgCO<sub>2</sub>, apresentando um aumento de 47% para o período de 1990 a 2008, o que fez com que a média anual saltasse para, aproximadamente 2,15%. Sendo o óleo diesel, o combustível com maiores índices de contribuição para as emissões de CO<sub>2</sub> (33%), seguido pela gasolina, que representou 16% dos totais das emissões, e o gás natural com uma representatividade de 12% nos totais das emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da queima de combustíveis fósseis. Como era esperado, o setor de transportes foi o que mais contribuiu para as emissões de CO<sub>2</sub>, representando 55,3% do total de emissões deste gás, proveniente da queima de combustíveis fósseis (CETESB, 2011).

Na Figura 9 são apresentadas as diferenças nas concentrações totais de CO<sub>2</sub> emitidas provenientes da queima de combustíveis fósseis, entre as abordagens descritas acima. Foi identificado que a abordagem de referência faz uso de um número maior de variáveis e por isso apresenta um valor maior nas concentrações do CO<sub>2</sub> em todos os anos.

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Abordagem de Referência [Gg <sub>CO2</sub> ] (A)	56.958	59.736	60.094	61.738	67.191	69.249	76.452	74.327	74.933	69.978
Abordagem Setorial [Gg <sub>CO2</sub> ] (B)	51.305	53.049	53.492	54.610	59.101	61.264	68.568	73.218	73.744	74.465
Diferença (%) ((A-B)/B)*100	11,0	12,6	12,3	13,1	13,7	13,0	11,5	1,5	1,6	-6,0

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
Abordagem de Referência [Gg <sub>CO2</sub> ] (A)	77.231	74.621	73.618	72.291	77.754	79.792	77.144	79.345	79.231	
Abordagem Setorial [Gg <sub>CO2</sub> ] (B)	72.612	70.855	68.691	69.252	70.510	71.136	71.757	75.093	77.233	
Diferença (%) ((A-B)/B)*100	6,4	5,3	7,2	4,4	10,3	12,2	7,5	5,7	2,6	

Figura 9 - Emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da queima de combustíveis fósseis estimadas pelas abordagens de referência (A) e setorial (B), no estado de São Paulo (CETESB, 2011).

Em 2020, a CETESB publicou relatório de emissões veiculares para todo o estado de São Paulo (CETESB, 2020a). Este relatório apresentou a quantidade emitida de GEE em relação a cada combustível utilizado, onde o total de emissão chegou a 38.495 Gg de CO<sub>2eq</sub> emitidos referentes a fontes veiculares. Na Figura 10 são apresentados os valores de emissões totais estimados por cada combustível presente no relatório. Importante ressaltar que assim como no 1º Inventário de emissão discutido acima, o diesel o combustível que mais contribuiu para a emissão dos GEE, para o ano de 2019.

Categoria		Combustível	CO <sub>2eq</sub> (mil t)
Automóveis		Gasolina C	4.920
		Etanol Hidratado	12
		Flex-Gasolina C	5.069
		Flex-Etanol Hidratado	477
Comerciais Leves		Gasolina C	1.279
		Etanol Hidratado	1
		Flex-Gasolina C	979
		Flex-Etanol Hidratado	70
		Diesel	2.661
Caminhões	Semileves	Diesel	235
	Leves		1.331
	Médios		726
	Semipesados		6.813
	Pesados		7.897
Ônibus	Urbanos	Diesel	3.082
	Micro-ônibus		283
	Rodoviários		1.566
Motocicletas		Gasolina C	883
		Flex-Gasolina C	210
		Flex-Etanol Hidratado	nd
<b>Total</b>			<b>38.495</b>

Figura 10 - Estimativas das emissões de GEE de origem veicular no estado de São Paulo em 2019, conforme relatório de emissões veiculares divulgados pela CETESB, 2020a.

#### 2.1.4. CO<sub>2</sub> na cidade de São Paulo

Foi publicado no ano de 2013 um inventário de emissão focado apenas na cidade de São Paulo. Este inventário foi elaborado pelo instituto privado EKOS em parceria com a Geoklock Consultoria e Engenharia Ambiental, seguindo os mesmos padrões dos inventários de emissões já citados nesta revisão bibliográfica (EKOS e Geoklock, 2013). Foi identificado que o CO<sub>2</sub> foi o gás que obteve as maiores emissões de GEE dentro do município de São Paulo, no período analisado (2003 até 2009), como pode ser observado na Figura 11.

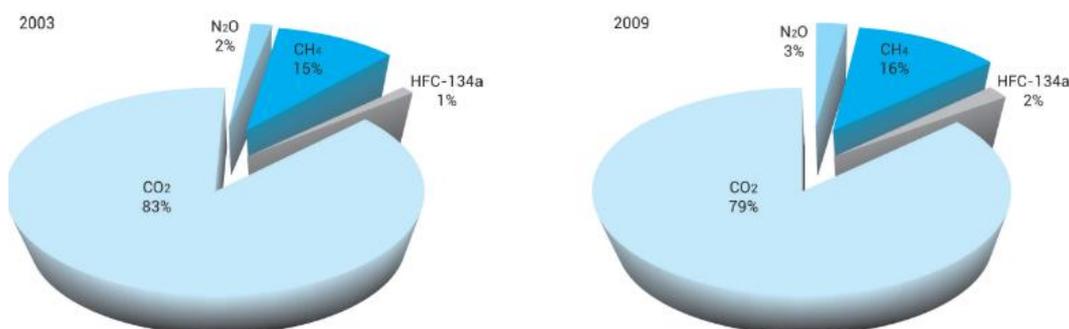


Figura 11 - Perfil das emissões percentuais do Município de São Paulo por GEE entre os anos de 2003 e 2009, divulgados pelo Inventário de emissões realizado por (EKOS e Geoklock, 2013).

Assim como nos outros inventários, o setor de energia foi o maior contribuinte para as emissões de CO<sub>2</sub> no município (~99% das emissões de CO<sub>2</sub>), porém, destacou-se no inventário uma diminuição das concentrações deste gás entre os anos de 2003 (12.564 Gg CO<sub>2eq</sub>), e o ano de 2009 (11.994 CO<sub>2eq</sub>). Esta dominância do setor de energia na emissão do CO<sub>2</sub> na cidade de São Paulo fica ainda mais evidente quando se observa a Figura 12. Os demais setores inventariados não representaram nem 1% de todo o CO<sub>2</sub> emitido pela cidade de São Paulo.

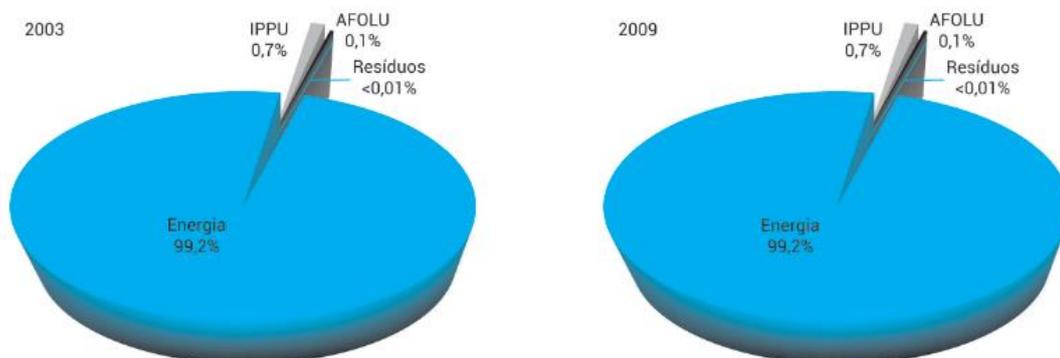


Figura 12 - Perfil das emissões percentuais de CO<sub>2</sub> por setor, entre os anos de 2003 e 2009, dentro da cidade de São Paulo. Resultados retirados do Inventário de Emissão elaborado por (EKOS e Geoklock, 2013).

Corroborando com o inventário publicado pela EKOS e Geoklock, 2013, o SEEG disponibilizou os dados de emissões de CO<sub>2</sub> na cidade de São Paulo até o ano de 2018 (Figura

13). Notou-se a superioridade do setor de energia nas emissões de CO<sub>2</sub> no município de São Paulo desde o ano de 2000 até 2018, sendo que o ano de 2018 registrou um total de, aproximadamente, 12 MtCO<sub>2</sub> emitidas pelo setor de energia, enquanto o segundo setor mais representativo nas emissões de CO<sub>2</sub> foi responsável por apenas 72 tCO<sub>2</sub> (LULUCF).

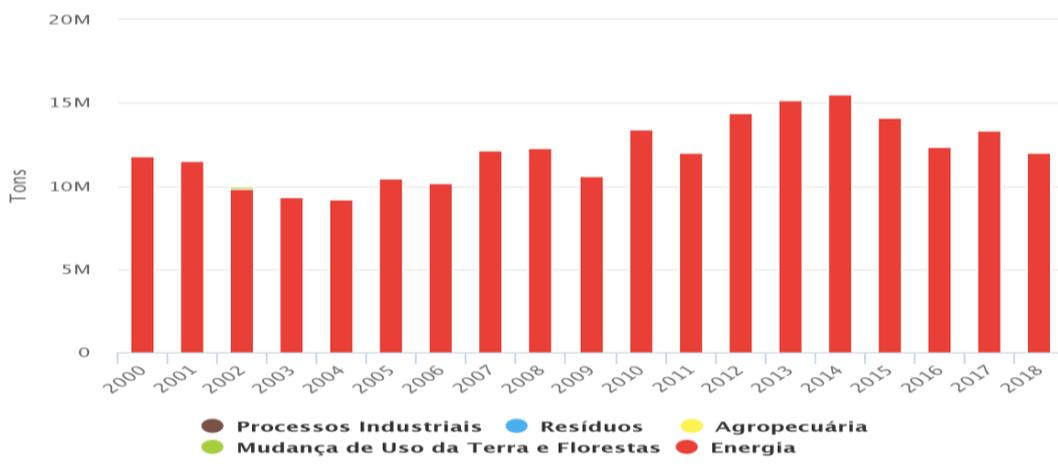


Figura 13 - Emissões de CO<sub>2</sub>, em toneladas, na cidade de São Paulo. Gráfico elaborado pelo SEEG e encontra-se disponível em [https://plataforma.seeg.eco.br/total\\_emission](https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission), data de acesso 01/03/2022

## 2.2. CO

Monóxido de carbono é um gás inodoro, incolor, mais leve que o ar e que não causa irritações nos olhos ou vias respiratórias, porém interfere na troca de oxigênio por todo o corpo e pode causar óbito (Kubba, 2017). O CO é a principal causa de mortes por envenenamento nos Estados Unidos e ocorre quando há combustão incompleta de materiais contendo carbono, como carvão, madeira, gás natural, querosene, gasolina, carvão, óleo combustível, tecidos e plásticos (Kubba, 2017). O CO é normalmente encontrado na fumaça produzida sempre que o combustível é queimado em carros ou caminhões, motores pequenos, fogões, lanternas, grelhas, lareiras, fogões a gás ou fornalhas. A maior fonte de emissão de CO encontra-se no escapamento de veículos motorizados, que contribui com cerca de 56% de todas as emissões de CO nos Estados Unidos, com motores e veículos não rodoviários representando outros 22% (Miller, 2011). Altas concentrações de CO ocorrem em áreas com congestionamento de tráfego intenso, onde até 95% de todas as emissões de CO podem vir do escapamento de automóveis (Miller, 2011). Outras fontes incluem processos industriais, queima de combustível fora do transporte e fontes naturais, como incêndios florestais.

Na Europa as concentrações de CO foram publicadas no inventário de emissão elaborados pela agência europeia do meio ambiente (European Environment Agency, 2016).

As concentrações totais podem ser observadas na Tabela 5. Podem ser observadas reduções nas concentrações do CO em todas as cidades inventariadas, sendo que as maiores reduções do CO foram registradas entre os anos de 2010 e 2011, devido a mudança na composição do combustível e a melhora na tecnologia de combustão empregada nos veículos. Segundo o inventário as reduções nas emissões do setor de transporte foram de ~81%, quando comparado todo o período. Para a Europa, os principais contribuintes para a emissão do CO foram os setores Comerciais, Industriais e domésticos (aqui agregados em um único grupo) e o setor de transporte rodoviário, que somados representam 67% de toda as emissões do poluente.

*Tabela 5 - Emissões do CO (em Gg) dos países membros da União Europeia, que forneceram os dados para a elaboração do inventário (European Environment Agency, 2016)*

Estados Membros	CO(Gg)										Variação	
	1990	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	1990 - 2011	2010 - 2011
Áustria	1.436	1.274	958	814	774	722	684	638	645	609	-58%	-5,6%
Bélgica	1.356	1.055	897	720	623	621	617	383	468	387	-71%	-17,3%
Bulgária	731	510	370	350	361	308	285	254	275	285	-61%	3,5%
Chipre	56	48	36	28	26	25	23	21	19	18	-68%	-7,6%
República Checa	1.030	897	643	511	484	509	439	403	402	382	-63%	-5,1%
Dinamarca	732	654	493	468	461	473	454	426	419	383	-48%	-8,7%
Estônia	227	197	183	158	144	163	167	168	172	148	-35%	-14,1%
Finlândia	721	623	610	530	507	501	486	465	485	455	-37%	-6,2%
França	11.040	9.381	6.581	5.209	4.701	4.431	4.277	3.802	4.276	3.584	-68%	-16,2%
Alemanha	12.405	6.604	4.860	3.703	3.625	3.525	3.442	3.060	3.504	3.314	-73%	-5,4%
Grécia	1.131	953	921	719	736	680	621	589	525	491	-57%	-6,3%
Hungria	21	545	499	490	502	478	479	473	478	396	> 100 %	-17,2%
Irlanda	402	314	252	191	182	158	158	151	139	127	-68%	-8,9%
Itália	6.971	6.970	4.657	3.270	3.039	2.721	2.721	2.477	2.516	2.464	-65%	-2,1%
Letônia	455	347	288	285	277	249	249	269	257	226	-50%	-12,0%
Lituânia	499	259	237	190	202	177	177	169	209	194	-61%	-7,2%
Luxemburgo	484	286	93	64	57	44	44	38	39	39	-92%	-0,4%
Malta	24	30	1	1	1	1	1	31	11	12	-55%	690,0%
Holanda	1.124	915	744	632	622	60	604	552	551	529	-53%	-4,0%
Polônia	7.406	4.547	2.633	2.649	2.857	2.739	2.769	2.715	3.052	2.916	-61%	-4,5%
Portugal	833	832	701	507	474	445	428	397	389	372	-55%	-4,3%
Romênia	1.238	956	1.373	1.432	1.129	1.128	1.228	1.118	1.105	1.014	-18%	-8,2%
Eslováquia	515	423	300	272	273	249	245	208	221	227	-56%	2,8%
Eslovênia	336	301	213	178	169	163	159	155	161	148	-56%	-7,8%
Espanha	3.669	3.159	2.682	2.109	2.084	2.077	1.937	1.753	1.839	1.797	-51%	-2,3%
Suécia	1.278	1.126	825	668	628	616	607	606	586	570	-55%	-2,7%
Reino Unido	9.083	7.552	5.664	3.552	3.335	3.031	2.838	2.377	2.241	2.145	-76%	-4,3%
<b>EU-27</b>	<b>65.203</b>	<b>50.756</b>	<b>37.715</b>	<b>29.696</b>	<b>2.872</b>	<b>27.013</b>	<b>26.137</b>	<b>23.698</b>	<b>24.985</b>	<b>23.232</b>	<b>-64%</b>	<b>-7,0%</b>

\* EU-27 – Somatória das concentrações totais do monóxido de carbono informadas pelos estados membros

### 2.2.1. CO no Brasil

No Brasil, as emissões nacionais de CO foram estimadas pelo SEEG, embora nos relatórios publicados pela organização não haja um estudo detalhado das emissões de CO por setor, no site criado para divulgação dos resultados obtidos pelo SEEG ([https://plataforma.seeg.eco.br/total\\_emission](https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission)), ao longo dos anos foram disponibilizados para o público os dados de emissões de diversos gases em diferentes unidades de medidas. Na tabela 6, pode-se observar as emissões estimadas no país por setor.

*Tabela 6 - Emissões de CO no país por setor (Fonte: dados divulgados pelo SEEG e encontra-se disponível em [https://plataforma.seeg.eco.br/total\\_emission](https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission), data de acesso 01/03/2022)*

<b>CO (Tons)</b>	<b>Mudança de Uso da Terra e Florestas</b>	<b>Resíduos</b>	<b>Processos Industriais</b>	<b>Agropecuária</b>	<b>Energia</b>	<b>Total</b>
<b>2000</b>	0	0	970.507	1.623.878	6.528.652	9.123.037
<b>2001</b>	0	0	900.145	1.733.595	6.257.866	8.891.606
<b>2002</b>	0	0	947.620	1.843.857	6.412.128	9.203.605
<b>2003</b>	0	0	1.073.007	2.036.848	6.591.507	9.701.362
<b>2004</b>	0	0	1.221.245	2.105.809	6.753.704	10.080.758
<b>2005</b>	0	0	1.189.973	2.108.835	6.658.432	9.957.240
<b>2006</b>	0	0	1.152.475	2.264.248	6.486.780	9.903.502
<b>2007</b>	0	0	1.210.138	2.478.491	6.559.277	10.247.905
<b>2008</b>	0	0	1.195.658	2.402.992	6.708.472	10.307.122
<b>2009</b>	0	0	790.857	2.104.036	6.144.670	9.039.563
<b>2010</b>	0	0	984.456	1.860.314	6.401.153	9.245.923
<b>2011</b>	0	0	1.024.859	1.528.313	6.170.325	8.723.497
<b>2012</b>	0	0	987.852	1.248.376	6.115.587	8.351.815
<b>2013</b>	0	0	919.985	1.119.647	6.094.695	8.134.326
<b>2014</b>	0	0	899.524	975.809	6.269.012	8.144.345
<b>2015</b>	0	0	898.542	594.907	6.268.034	7.761.483
<b>2016</b>	0	0	784.809	515.211	6.006.218	7.306.239
<b>2017</b>	0	0	838.505	434.227	6.123.510	7.396.241
<b>2018</b>	0	0	867.742	509.519	6.377.930	7.755.191
<b>2019</b>	0	0	862.702	388.849	6.384.091	7.635.643
<b>2020</b>	0	0	848.965	334.694	6.349.953	7.533.612

Tanto na tabela 6, quanto na Figura 14, ficou evidente que o setor da energia foi o que mais contribuiu para os maiores valores de emissões de CO ao longo de toda a série temporal. Também se nota, que assim como os países ao longo do globo, as emissões de CO vem diminuindo ano após ano, com exceções dos anos de 2007, 2008, 2014, 2017 e 2018, que apresentaram uma taxa de aumento de 3,4%, 0,6%, 0,1%, 1,2% e 4,7%, respectivamente. Destaca-se que entre os anos de 2018 e 2019 houve uma redução de 1,6% no total das emissões de CO, já para o biênio seguinte esta redução foi de 1,3%.

Table

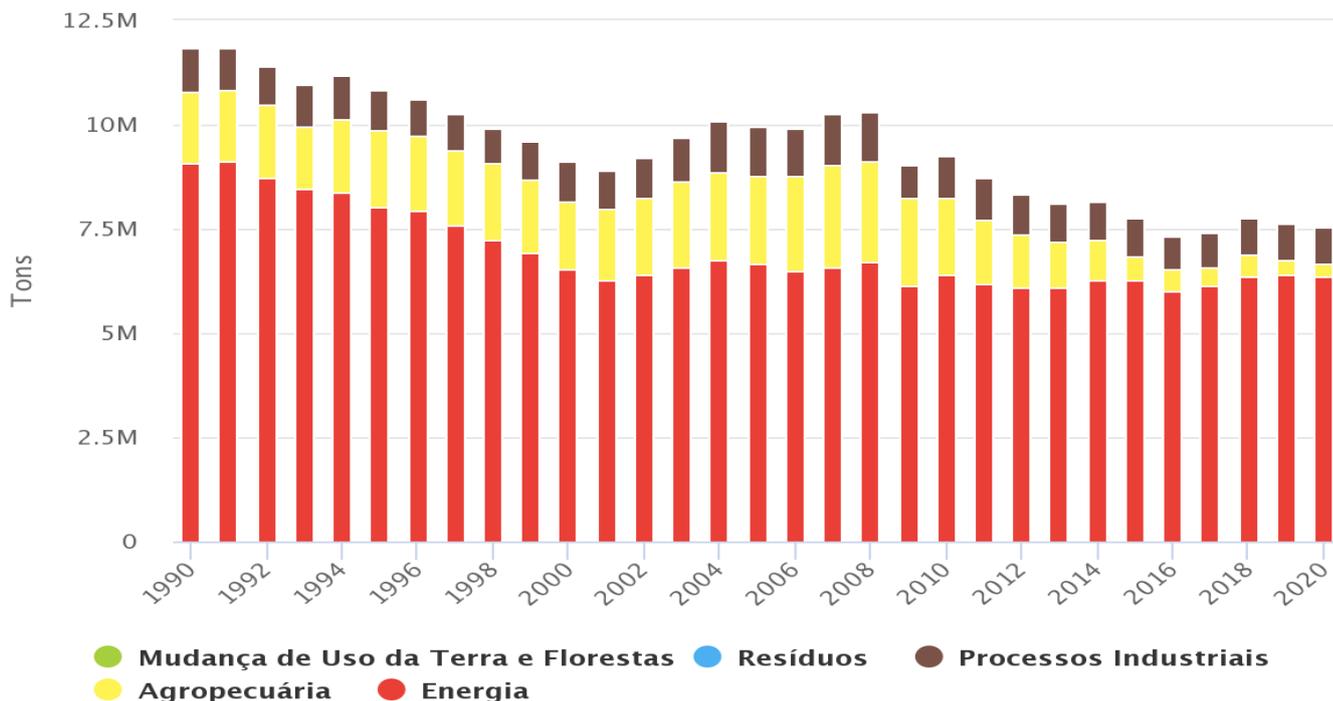


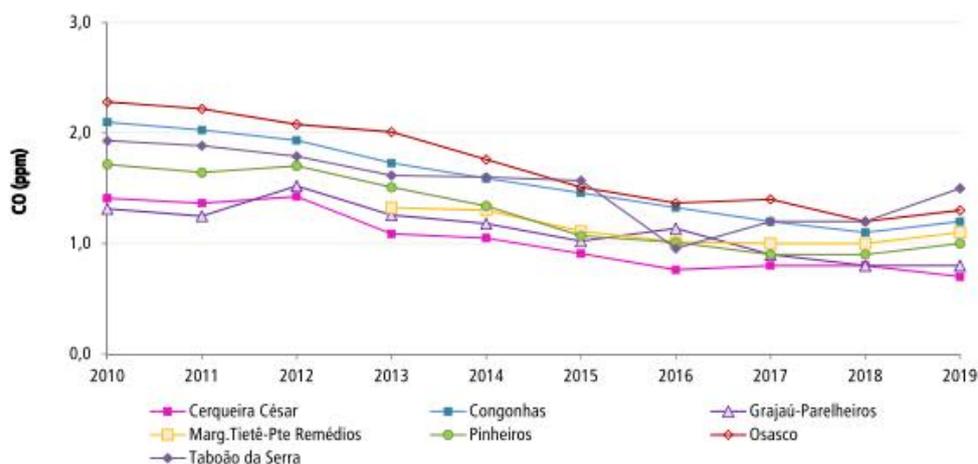
Figura 14 - Emissões de CO no Brasil, em Toneladas. Gráfico elaborado pelo SEEG e encontra-se disponível em [https://plataforma.seeg.eco.br/total\\_emission](https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission), data de acesso 01/03/2022.

### 2.2.2. CO no Estado de São Paulo e na Região Metropolitana da Grande São Paulo (RMSP)

Segundo o Relatório de Qualidade do Ar, publicado pela CETESB, no ano de 2020 (CETESB, 2020b), o monóxido de carbono possui uma ampla rede monitoramento em várias cidades do estado. Para o ano de 2019, foram monitoradas as concentrações de CO nas cidades de Campinas, Ribeirão Preto, São José dos Campos e na RMSP. Assim como no ano de 2017 (CETESB, 2017a), as maiores concentrações do poluente foram observadas na RMSP, porém, em nenhum dos sítios de coleta foram registradas concentrações que ultrapassassem o padrão permitido para média móvel de 8 horas (9 ppm, de acordo com o Decreto Estadual nº 59.113/2013 (São Paulo, 2013)). Com exceção da RMSP, as concentrações desse poluente sofreram redução gradual ao longo do tempo, que segundo a CETESB, 2020, se deve à renovação da frota de veículos circulantes nestas regiões, mas ressalta que a queda nas concentrações de CO vem diminuindo ao longo dos últimos anos. Já para a RMSP, a CETESB, 2020 destacou um ligeiro aumento nas concentrações médias do CO para o ano de 2019 quando comparado com o ano de 2018, sendo o principal motivo o aumento de interdições em rodovias,

marginais e ruas que cortam a RMSP, e que contribuíram para o aumento do trânsito em longos períodos durante o ano.

As maiores concentrações do CO no estado de São Paulo foram registradas dentro da RMSP, durante os meses de inverno, isto ocorre devido às condições meteorológicas serem menos favoráveis a dispersão deste, e de outros poluentes (como destacado no item 2.1), impactando diretamente a qualidade do ar durante estes meses (CETESB, 2020b). Ao longo do ano de 2019 foram emitidos cerca de 120 mil t/ano, de monóxido de carbono para a atmosfera. Sendo os veículos leves movidos à gasolina, as principais fontes de emissão de CO na RMSP, representando cerca de 34%, dos 74% relativos a emissão do CO por veículos (CETESB, 2020b). As motos, mesmo representando um montante menor, quando comparadas aos números de carros circulantes, também possuem uma emissão de CO significativa, chegando a 18% do total das emissões, isto porque, historicamente os fatores de emissão deste subgrupo são maiores. Por fim, no ano de 2019, a (CETESB, 2020) considerou que a qualidade do ar foi “BOA” em todas as medições realizadas nas estações que monitoraram esse poluente na RMSP, sendo a maior concentração média de 8 horas observada na estação de São Caetano do Sul (5,7 ppm), seguida pela estação Taboão da Serra, com valor de 4,3 ppm. O histórico das concentrações médias de CO medidas nas estações da RMSP fora apresentado na Figura 15.



Fonte: CETESB (2020)

Figura 15 - Evolução das médias anuais das concentrações máximas diárias (médias de 8 horas) para a RMSP

Corroborando com os resultados discutidos acima, o SEEG também apresenta as emissões de CO, por setor par o estado de São Paulo (Figura 16). Foi possível identificar uma redução das emissões muito mais evidente que a nível nacional como mostrado na seção acima, além de que as emissões deste gás no estado de São Paulo, desde ano de 2016 possuem uma influência do setor industrial menor que 2%. Outro destaque fica para o aumento da

representatividade das emissões de CO atribuídas ao setor de energia, uma vez que no ano de 2016, este setor foi responsável por 71,9% do total das emissões e para o ano 2019, esta representatividade foi de 82,6%.

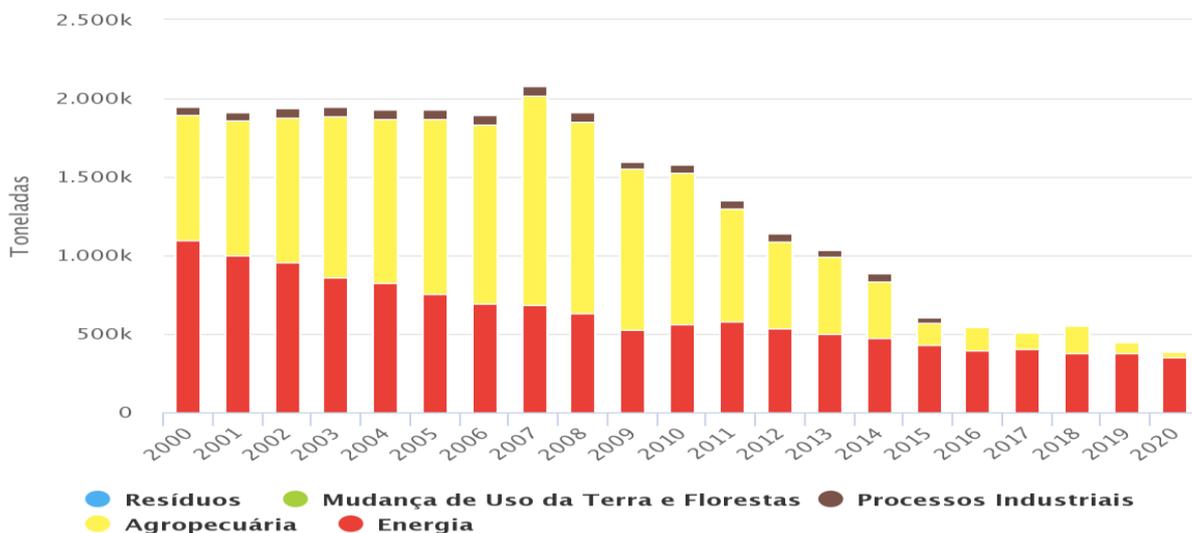


Figura 16 - Emissões de CO (em Toneladas), para o estado de São Paulo, por setor. Gráfico elaborado pelo SEEG e encontra-se disponível em [https://plataforma.seeg.eco.br/total\\_emission](https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission), data de acesso 01/03/2022)

### 2.2.3. CO na cidade de São Paulo

O SEEG surgiu como uma iniciativa do Observatório do Clima para a produção de estimativas anuais das emissões de GEE no Brasil. Seus produtos consistem desde um portal na internet para divulgação dos dados, até a criação de documentos analíticos sobre as evoluções das emissões de GEE, a níveis nacionais, estaduais e municipais (Azevedo *et al.*, 2018). Mesmo com uma metodologia robusta e validada no ano de 2018 (Azevedo *et al.*, 2018), o SEEG, possui ainda produtos em construção, como é o caso das estimativas de emissões de GEE à nível municipal. Existe uma nota de precaução acerca dos dados a níveis municipais divergirem dos dados a níveis nacionais e estaduais, devido, dentre outros motivos, ao processo de refinamento da escala espacial (“Seeg Brasil”, [s.d.]). Porém, mesmo com todos estes cuidados divulgados pelo SEEG, nota-se um padrão nas emissões de CO (Figura 17), para a cidade de São Paulo muito em linha com o discutido nos tópicos passados.

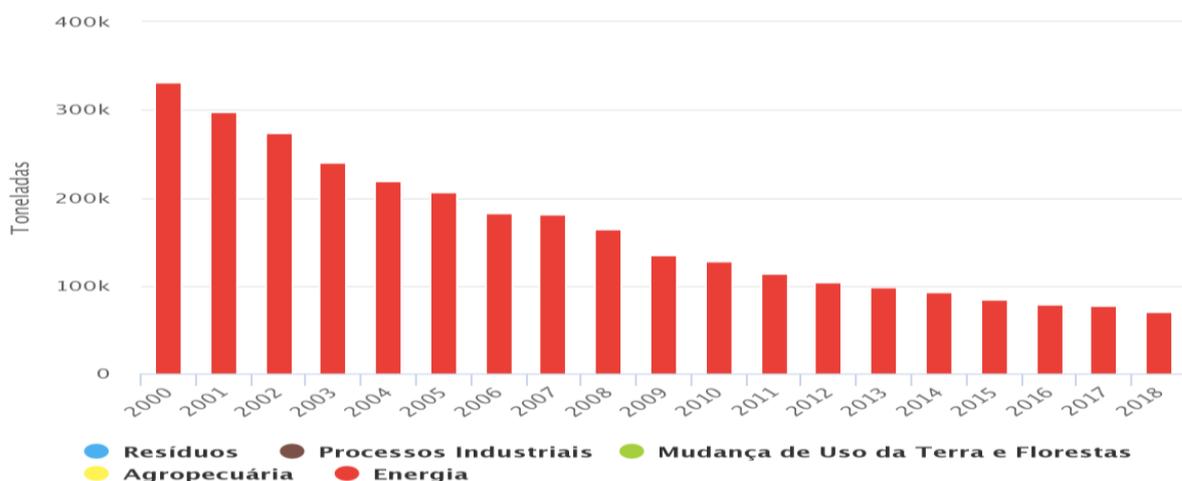


Figura 17 - Emissões de CO (em Toneladas), para a cidade de São Paulo, por setor. Gráfico elaborado pelo SEEG e encontra-se disponível em [https://plataforma.seeg.eco.br/total\\_emission](https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission), data de acesso 01/03/2022)

A Figura 17, mostra dois pontos que merecem o destaque. O primeiro sobre a clara diminuição nas emissões de CO ao longo dos anos, assim como apontado pelo relatório da qualidade do ar divulgado por CETESB, 2020, bem como a desaceleração na queda das emissões nos últimos anos. O segundo ponto que merece destaque se dá ao fato de que para a cidade de São Paulo, o setor de energia foi o único responsável pelas emissões de CO desde o ano de 2000 até o ano de 2018.

Assim, como o relatório da qualidade do ar divulgado pela CETESB, 2020 e pelos dados divulgados pelo SEEG, outro autor que identificou quedas nas concentrações de CO foi Rozante *et al.*, 2017, que utilizaram medidas de CO em três diferentes localidades, sendo dois destes sítios de coletas pertencentes a cidade de São Paulo, além de estarem próximos a locais com intenso tráfego de veículos. As estações utilizadas no trabalho são pertencentes à CETESB e ficam localizadas no aeroporto de Congonhas e a segunda no parque Ibirapuera (sendo esta, relativamente mais afastada das ruas). As concentrações medidas em todas as estações apresentaram forte variabilidade sazonal, onde os maiores valores foram registrados durante o inverno e os menores valores registrados no período dos meses referentes ao verão. Foram encontrados também, dois picos de máximas concentrações, bem definidas ao longo do dia, sendo um entre as 6 e as 10 hr da manhã e o outro entre as 17 e 20 hr. Rozante *et al.*, 2017, destacaram uma taxa de redução na concentração do CO de 63,7%, para a estação situada em Congonhas, no período de 2000 à 2015, associando esta queda nas concentrações as mudanças nas tecnologias veiculares dos combustíveis utilizados. Por fim, a média mensal registrada nas três estações foi de  $1,42 \pm 0,20$  ppm.

## **2.3.Acordos Climáticos**

As políticas públicas para mitigação das mudanças climáticas devem passar por revisões conforme a situação do clima no globo piora. Por este motivo, desde 1992 existiu conferências e acordos climáticos firmados por diversos países a fim de monitorar e diminuir as emissões dos GEE's. Logo, nesta seção veremos uma linha do tempo referente a cada uma das reuniões e acordos climáticos, bem como seus impactos na efetiva diminuição dos GEE's a nível global e a nível nacional.

### **2.3.1. Uma revisão dos acordos climáticos à nível Global**

Foi na cidade do Rio de Janeiro, em 1992, que ocorreu a primeira reunião mundial para a discussão das mudanças climáticas, bem como seus impactos para a sociedade e estratégias a serem tomadas para a mitigação destas mudanças no clima. Esta reunião ficou conhecida como “*Cúpula da Terra*” ou ECO-92. Desde então a Organização das Nações Unidas (ONU) promove discussões ambientais e climáticas por meio da criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC, do acrônimo em inglês). Dentre estas reuniões, alguns dos resultados mais importantes da UNFCCC são o Protocolo de Kyoto (1997), o Acordo de Copenhague (COP-15, 2009) e, mais recentemente, o Acordo de Paris (2015).

O acordo mais recente firmado entre as nações foi discutido na Conferência das Partes de Paris, no ano de 2015. Tendo como o principal objetivo fortalecer a ação climática global, exigindo estratégias de mitigação e adaptação (UNFCCC, 2015). O acordo de Paris foi assinado por 194 países, além da União Europeia e sua ratificação ocorreu no ano de 2021, com a assinatura de 190 países, incluindo a UE (UNFCCC, 2015).

Durante o ano de 2015 ocorreu também o lançamento da Agenda 2030 (ONU, 2015). Assim como o Acordo de Paris, a Agenda 2030 propõem metas e objetivos para um desenvolvimento mais sustentável, integrando o Planeta, as Pessoas e a Prosperidade, e através desta parceria promulgar a Paz (ONU, 2015). Ao todo são 17 objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) e 169 no Metas, que ao serem somados com o Acordo de Paris, se complementam para diminuir os impactos das mudanças climáticas e proporcionar um futuro sustentável (Kamigauti *et al.*, 2022 - submetido à publicação).

Em resumo, os acordos internacionais mencionados acima buscam um esforço global para mitigar as mudanças climáticas. No entanto, a realidade de cada país torna isso um desafio. Aspectos nacionais precisam ser cuidadosamente analisados, observando as ações de cada país

para contribuir com as questões das mudanças climáticas em nível global (Kamigauti *et al.*, 2022 - submetido à publicação).

### **2.3.2. Uma revisão dos acordos climáticos à nível Nacional**

O Brasil começou a promover ações para a mitigação das mudanças climáticas já no ano de 2009, motivado pelas discussões ocorridas na COP-15. Algumas destas ações foram:

- A criação do Fundo Nacional de Mudanças do Clima, através da Lei nº 12.114, publicada em 9 de dezembro de 2009 (Brasil, 2009).
- A Lei nº 12.187, publicada em 29 de dezembro de 2009, definiu as Políticas Nacionais de Mudanças do Clima (PNMC) (PNMC, 2009).
  - O PNMC teve como meta inicial a reduzir em 38,9% as emissões de GEE's até o ano de 2020. Porém como pode ser observado na Figura 5, as emissões de GEE's no ano de 2019 foi, aproximadamente 14% maior do que no ano de 2009 (SEEG, 2021).
- O Plano Nacional de Adaptação às Mudanças Climáticas do Brasil (PNA) foi lançado em 10 de maio de 2016, por meio da Portaria nº 150.
  - O PNA visa reduzir a vulnerabilidade nacional às mudanças climáticas e gerenciar seus impactos (MCTIC, 2015).
- Por fim, o Brasil também internalizou a Agenda 2030 como marco para o desenvolvimento sustentável, revisando as 169 Metas e adaptando-as ao contexto brasileiro nas ODS - Metas Nacionais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável em 2018 (IPEA, 2018).

Após o ingresso do Brasil no Acordo de Paris as metas traçadas pelo PNMC em 2009, foram revistas e as novas contribuições nacionalmente determinadas pelo Brasil (NDC), visam diminuir as emissões de GEE para 37% até 2025 e 43% até 2030, tendo como referência o ano de 2005 (UNFCCC, 2022). Segundo o MCTIC, 2016, as emissões de GEE no ano anterior ao Acordo de Paris (2014) já foram 43% inferiores às emissões de 2005. No entanto, este valor foi revisado pelo Observatório do Clima, com novas metodologias, e o resultado foi uma redução de 25%, das emissões de GEE's em 2014, quando comparados com 2005 (SEEG, 2021).

Embora o Acordo de Paris seja fundamental para a ação climática, sua implementação depende em grande parte de fatores políticos, como políticas orientadoras e do interesse de diferentes partes interessadas (Kamigauti *et al.*, 2022 - submetido à publicação). Por exemplo, a transição do governo de Dilma Roussef para o de Michael Temer, em 2016, foi marcada pelo impeachment e pela clara intenção de mudar várias políticas em curso. Seguiu-se a substituição de alguns diretores da estatal que faz os PDEs (Empresa de Pesquisa Energética, EPE) e as

alterações no próprio documento e a disponibilização de alguns dados geralmente públicos (Kamigauti *et al.*, 2022 - submetido à publicação). O mais importante em relação à ação climática foi a retirada do inventário de emissões de GEE (por exemplo, PDE 2026 p. 239). Portanto, a instabilidade política dentro e fora do Brasil em relação à ação climática é uma ameaça a ser considerada (Kamigauti *et al.*, 2022 - submetido à publicação).

### **3. JUSTIFICATIVA**

Entender o comportamento das emissões de GEE tem sido um grande desafio no mundo todo, devido às grandes incertezas presentes nos inventários de emissões como relatado por vários pesquisadores (Ciais *et al.*, 2014; Duren e Miller, 2012; Gately e Hutyra, 2017; Gurney *et al.*, 2015). Além disto, Duren e Miller, 2012 ressaltaram a importância de pesquisas mais significativas das emissões de CO<sub>2</sub> em megacidades como São Paulo, que mesmo com sendo a 4º maior megacidade do mundo, possui apenas um inventário de emissão de Gases de Efeito Estufa publicado (EKOS e Geoklock, 2013). Logo, entender o comportamento do CO<sub>2</sub> ao longo dos dias, suas variabilidades horárias, semanais, mensais e anuais, é de extrema importância para auxiliar os tomadores de decisões em medidas efetivas de mitigação, das principais fontes emissoras de CO<sub>2</sub> na cidade. Com essa motivação foi desenhado e está em andamento um projeto Temático com recursos da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), o projeto METROCLIMA ([www.metroclima.iag.usp.br](http://www.metroclima.iag.usp.br)), que visa implantar uma rede de monitoramento de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> em superfície combinado com dados de satélite e de sondagens verticais da coluna de CO<sub>2</sub>. Este presente trabalho se insere nessa Rede Metroclima que conta com 5 sítios de medida de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>: Pico do Jaraguá, IAG, Cientec, ICESP e Unicid. Detalhes dos sítios de medida e equipamentos utilizados podem ser consultados na página web do projeto.

### **4. OBJETIVOS**

Este trabalho possui como o objetivo a caracterização da variação temporal e espacial da concentração de CO<sub>2</sub> ao nível da superfície, para a cidade de São Paulo, buscando identificar as influências das emissões antrópicas e biogênicas na variação temporal e espacial das concentrações de CO<sub>2</sub>.

#### **4.1. Objetivos Específicos**

- Entender o comportamento diurno e noturno das concentrações de CO<sub>2</sub> em dois sítios de coleta (IAG e Pico do Jaraguá), a fim de identificar uma possível correlação entre as concentrações, bem como as fontes emissoras predominantes nos dois sítios.
- Entender as variações nas concentrações do CO<sub>2</sub> ao longo das estações do ano. Analisar quais fatores podem estar associados a mudança nos perfis de concentrações destes gases em cada estação.

- Identificar possíveis transportes das concentrações de CO<sub>2</sub> coletadas no sítio do IAG e Pico do Jaraguá. Estimando, se houver, os impactos destes transportes para a qualidade do ar em áreas mais afastadas do centro urbano.



acumulada mensalmente ocorre em fevereiro, sendo esperados valores de até 255 mm (Oliveira, Bornstein e Soares, 2003).

Segundo Ribeiro et al. 2018, a variação sazonal dos ventos, em superfície, na cidade de São Paulo é devido a influência de alguns fatores, como: a posição geográfica em que a cidade está localizada, da intensidade do sistema semi-estacionário do Anticiclone do Atlântico Sul e de baixa pressão continental. Estes fatores induzem ventos de superfície de N-NE durante o verão e de NE-L durante o inverno. No entanto, esse padrão sofre interferências ao longo de quase todo o ano devido à passagens de sistemas frontais e da atuação de sistemas de brisa marítima (Ribeiro *et al.*, 2018). A atuação das frentes frias são mais comuns durante o inverno austral e estas estão associadas a dois padrões de ventos distintos, sendo o primeiro de NO (zona pré-frontal), e o segundo de SE (zona pós frontal) (Garreaud e Wallace, 1998; Oliveira, Bornstein e Soares, 2003; Ribeiro *et al.*, 2018). Embora os ventos da frente fria sejam mais intensos, os ventos pós-frontais de SE são mais persistentes e definem a direção média do vento na RMSP, que é a direção predominante de propagação do sistema de brisa (Ribeiro *et al.*, 2018).

Por fim, na cidade de São Paulo encontra-se a maior frota de veículos, quando comparada com outras cidades do Brasil, no que diz respeito a queima de combustíveis, como: etanol, gasool e biodiesel. Segundo o IBGE, 2017, a frota veicular da cidade ultrapassa 8 milhões de veículos, distribuídos entre motos, carros, caminhões e ônibus.

## **5.2. Sítios de coleta**

Para a realização desta pesquisa foram escolhidos dois sítios de medições de gases de efeito estufa, localizados em regiões estratégicas para identificação de emissões características pertinentes a cada local de estudo. O primeiro sítio está situado no Instituto de Astronomia, Geofísicas e Ciências Atmosféricas (IAG), da Universidade de São Paulo (USP), com coordenadas geográficas 22°34' S e 46°44' O, a uma altura de 731 m em relação ao nível médio do mar, onde a altura do *inlet* se encontra 15 m acima do nível do solo, no telhado do prédio principal do IAG (Metroclima, [s.d.]; Vara-Vela *et al.*, 2018). O Sítio do IAG (Figura 19a) está rodeado por importantes vias de tráfego de veículos, sendo um importante sítio de monitoramento de GEE referente às emissões antropogênicas.



Figura 19: a) Estação de coleta situada no IAG. b) Estação de coleta situada no Pico do Jaraguá.

Como o primeiro sítio de coleta possui muita influência do entorno extremamente urbanizado, foi procurado um segundo sítio dentro da cidade de São Paulo que sofresse menos interferência das fontes antropogênicas. Logo, o sítio do Pico do Jaraguá (SPJ) (Figura 19b.) fica situado a 1080 m de altura em relação ao nível médio do mar (CETESB, 2020b), totalizando 348 m de elevação em relação ao sítio do IAG. O SPJ está localizado nas coordenadas geográficas  $23^{\circ}27' S$  e  $46^{\circ}46' O$ , e está cercado por estradas com tráfegos intensos de veículos pesados, porém, como pode-se observar na Figura 20, possui uma área vegetada mais abundante que o sítio de coleta do IAG.

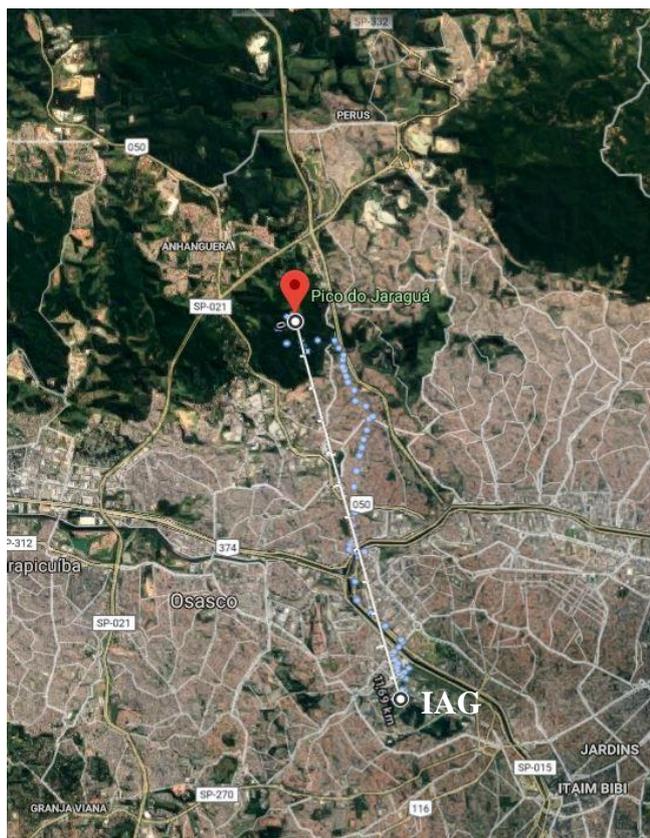


Figura 20 - Características do entorno dos sítios de coleta. Fonte: Google Maps  
<<https://goo.gl/maps/EvXBppMYrvq86wkp7> acessado em 16/07/2019>

### 5.3. Equipamento para monitoramento do CO<sub>2</sub>

Para a realização desta pesquisa foram utilizados dois equipamentos de alta precisão na medição de concentração de Gases de Efeito estufa colocados nos dois sítios descritos na sessão anterior. O monitor Picarro G2301 (Figura 19a) utiliza uma técnica conhecida como CRDS (do inglês: *Cavity Ring-Down Spectroscopy*). A utilização de tal equipamento é recomendada por diversos autores que necessitaram analisar a concentração de gases como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, etc. (Nara *et al.*, 2012; Richardson *et al.*, 2012; Verhulst *et al.*, 2017; Viatte *et al.*, 2017; Xiao *et al.*, 2014; Xueref-Remy *et al.*, 2018). Sua acurácia e qualidade na medida de concentrações realmente baixas também foram descritas por vários autores (Brannon *et al.*, 2016; Reum *et al.*, 2017, 2019). Além destes relatos e a quantidade de referências bibliográficas, o uso da tecnologia CRDS foi recomendada pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, do acrônimo em inglês) (EMPA, 2013), tornando o equipamento da Picarro o mais indicado para a coleta dos gases analisados nesta pesquisa.

## **5.4. Série temporal dos dados**

Nesta sessão serão abordadas todas as fontes de levantamento de dados utilizados na realização desta pesquisa. É importante destacar que por motivos práticos o período utilizado para as análises que serão discutidas na sessão 6, foi o ano de 2019. Logo, qualquer informação referente aos dados que não cite o período de aquisição deve ser subentendida como pertencentes ao ano de 2019.

### **5.4.1. CO<sub>2</sub>**

Os dados de CO<sub>2</sub> começaram a ser coletados nos sítios descritos no tópico 5.2 desde o ano de 2013. No entanto, devido a instabilidades momentâneas e realização de experimentos que necessitaram do deslocamento dos equipamentos (como experimentos em túneis descritos em Nogueira et al., 2021), as séries temporais possuem uma quantidade muito grande de dados faltantes. Logo, para evitar ao máximo conclusões que pudessem estar enviesadas devido à ausência de dados, optou-se por utilizar o período do ano de 2019 que contempla a série temporal com menor quantidade de dados faltantes nos dois sítios de coleta.

### **5.4.2. CO e PM<sub>2,5</sub>**

Os dados do monóxido de carbono (CO) e material particulado inalável fino (MP<sub>2,5</sub>) foram medidos nas estações de qualidade do Ar monitoradas pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. Sendo o CO medido na estação localizada em Pinheiros (Figura 21). Já os dados de PM<sub>2,5</sub> foram medidos na estação localizada no Pico do Jaraguá.

Importante destacar que a estação Pinheiros foi escolhida devido a sua proximidade com o sítio do IAG e a qualidade na série temporal dos dados desejados durante o período do estudo.

### **5.4.3. Meteorológicos**

Para a análise de dispersão dos poluentes, bem como a possibilidade de identificação do transporte de um sítio a outro, foram necessários o levantamento dos dados de velocidade e direção dos ventos na cidade de São Paulo. Logo, para as análises utilizando os dados de velocidade de vento e direção em médias horárias, estes foram obtidas das estações meteorológicas da Rede Telemétrica da CETESB. Já para as análises utilizando os dados de velocidade e direção dos ventos em médias diárias, os dados foram fornecidos pelo laboratório de Micrometeorologia do IAG-USP (<http://www.labmicro.iag.usp.br/>).

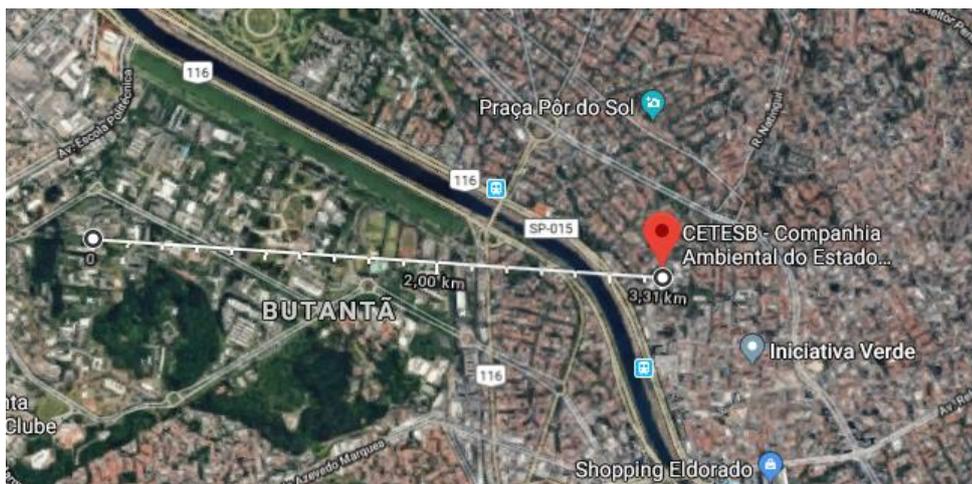


Figura 21 - Distância em km do sítio do IAG até a estação meteorológica da Estação Pinheiros da Rede Telemétrica da CETESB. Fonte: Google Maps <https://goo.gl/maps/E2hixPjyLQrLHVp8> acessado em 18/07/2019

Outros dados meteorológicos utilizados nesta pesquisa foram o de precipitação e temperatura. Os dados de temperatura foram obtidos das estações da CETESB, tanto na Estação Pinheiros para correlações com os poluentes coletados no sítio do IAG, como coletados na Estação Pico do Jaraguá para comparação com os poluentes coletado no sitio SPJ. Também foram utilizados dados de temperatura do laboratório de Micrometeorologia do IAG-USP para correlações e validações dos dados obtidos na estação da CETESB. Os dados de precipitação foram fornecidos pelo laboratório de Micrometeorologia do IAG-USP e seus acumulados estão em mm/dia.

## 5.5. Tratamento dos dados

Após a definição do período, os dados foram submetidos a análises estatísticas para realizar a remoção dos dados considerados “outliers”. Neste trabalho, utilizaram-se as equações 1.1 e 1.2 para a identificação e remoção dos valores que fossem discrepantes em relação à série temporal (nos limiares de percentil 95).

$$\sigma_+ + 1,5 * FIQ \leftarrow NA \quad (1.1)$$

$$\sigma_- - 1,5 * FIQ \leftarrow NA \quad (1.2)$$

onde:  $\sigma_+$  refere-se ao percentil de 95%;  $\sigma_-$  refere-se ao percentil de 25%; e a faixa interquartil (FIQ), calcula-se através das diferenças entre os quartis.

Após a remoção dos outliers, foram calculados os valores médios, máximos, mínimos e os desvios padrões de cada poluente medido em ambos os sítios. Para as comparações do dióxido de carbono entre os sítios, os dados foram analisados, primeiramente, com uma média

a cada minuto. Para as etapas seguintes os dados de CO<sub>2</sub> foram analisados em média horária para comparação com os dados meteorológicos e concentração de CO. Os valores do CO e as análises comparando os poluentes com as componentes do vento ocorreram apenas para o sítio do IAG.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são discutidos todos os resultados obtidos nesta pesquisa a fim de responder às questões apresentadas nos objetivos propostos. Destaca-se que os resultados das concentrações de CO<sub>2</sub> para o sítio do IAG se encontram na cor azul escuro, já para o Pico do Jaraguá, que neste tópico será abreviado para SPJ, estão apresentados na cor Preta. As concentrações de CO serão apresentadas na cor vermelha. As horas foram todas convertidas para o fuso de Brasília (GMT – 3) e não consideram o horário de verão. Os resultados das concentrações dos gases estão na unidade de medida “ppm”. As medidas da velocidade do vento encontram-se em m s<sup>-1</sup>, e a direção em °. A temperatura analisada foi convertida para °C, quando a mesma se apresentava em outra unidade. Os acumulados de precipitação se encontram em mm. Por fim, todas as correlações foram feitas utilizando-se o método de “*Spearman*” (Zar, 1972) uma vez que a distribuição dos dados de CO<sub>2</sub> se mostraram não normais (Croux e Dehon, 2010) (Apresentado no anexo I).

### 6.1. Concentrações de CO<sub>2</sub> desde o início das medições

A série temporal das concentrações no sítio do IAG começaram a ser determinadas a partir do ano de 2013, mas não de forma contínua, já as concentrações de CO<sub>2</sub> no SPJ, só se iniciaram no ano de 2016. Para visualizar o comportamento das concentrações do CO<sub>2</sub> desde o início do período de coleta, em ambos os sítios, foi elaborada a Figura 22, afim de identificar possíveis perfis de variação nas emissões desde o ano de 2013 até o ano de 2019. Nota-se na figura que em ambos os sítios não foi possível obter uma série temporal completa entre os anos do início da coleta até o ano de 2019. Porém, o ano de 2019 é o que apresenta a maior quantidade de dados coletados em ambos os sítios simultaneamente. Por este motivo as discussões acerca das variabilidades das concentrações de CO<sub>2</sub>, bem como as correlações com outras variáveis (poluentes e meteorológicas), serão feitas apenas para este ano e não para a série temporal completa, visando diminuir as incertezas que poderiam ser geradas devido à ausência de dados (Verhulst *et al.*, 2017; Xueref-Remy *et al.*, 2018).

### Série temporal completa do CO<sub>2</sub> para o ambos os sítios

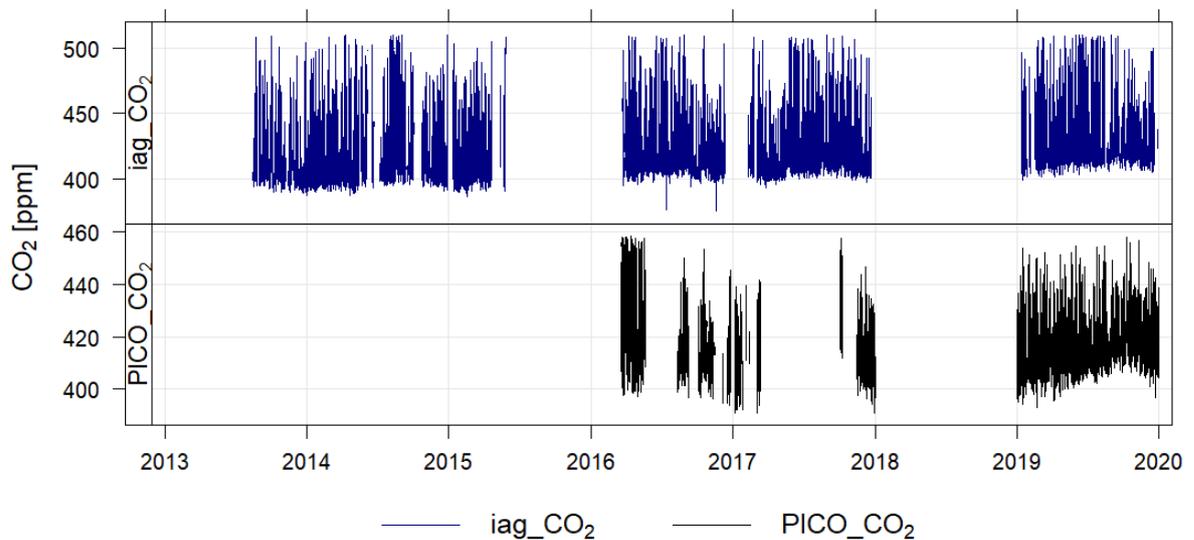


Figura 22 - Série temporal das concentrações de CO<sub>2</sub> em ambos os sítios desde o início da coleta, que data de 2013 para o sítio do IAG e 2016 para o SPJ. Os dados das concentrações encontram-se em ppm e foram ajustadas em médias horárias.

Da observação da Figura 22, mesmo com a quantidade de dados faltantes no sítio do IAG, foi possível identificar uma possível tendência de aumento nas concentrações medidas, verificada na Figura 23 com as médias mensais, que mostra mais claramente a linha de tendência em ambos os sítios. Nesse ajuste ficou mais explícita a tendência de aumento nas concentrações de CO<sub>2</sub> entre os anos de 2013 e 2019, com o destaque de uma possível inversão de sinal no final da série temporal. Já o SPJ, mesmo com a considerável quantidade de dados faltantes, não apresentou tendências, nem para aumento ou para diminuição das concentrações. Na verdade, o padrão observado na Figura 23, sugere uma variabilidade das concentrações de CO<sub>2</sub> mais parecida com “dentes de serra” (Ciais *et al.*, 2013) o que sugere que os dados nesta localidade sofram a influência de fontes mais locais e possivelmente, com grandes atuações de fontes biogênicas (Verhulst *et al.*, 2017; Xueref-Remy *et al.*, 2018). Porém, isto será mais bem discutido nos tópicos a seguir.

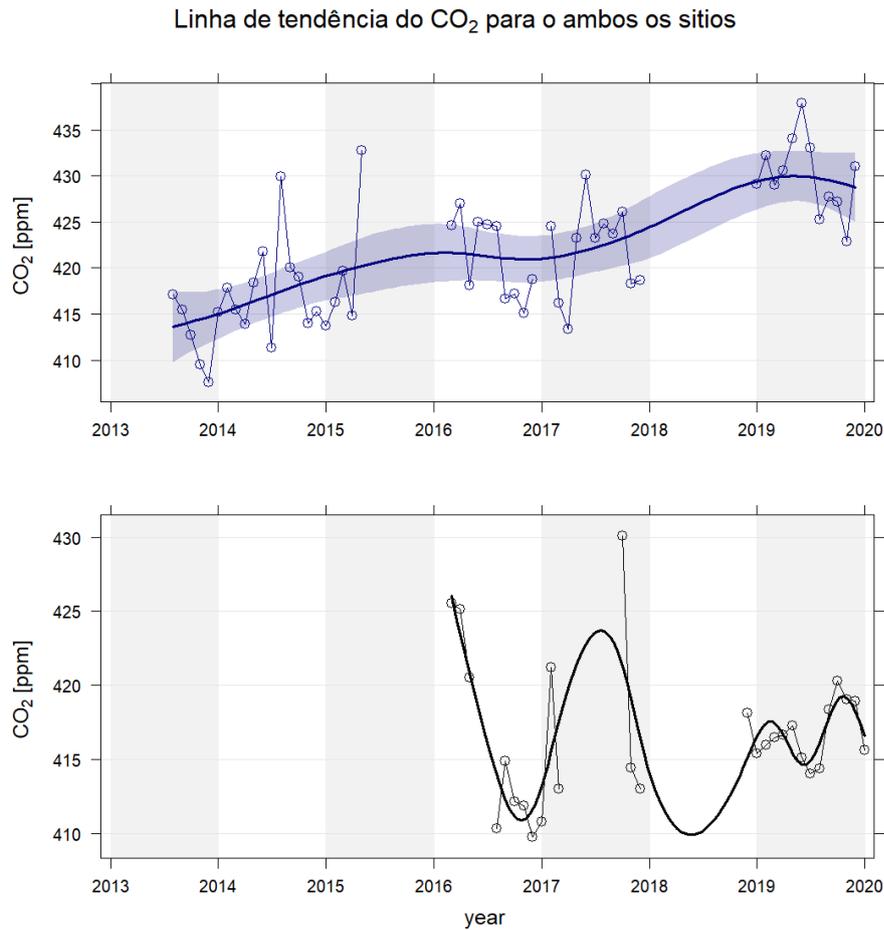


Figura 23 - Linha de tendência (linha contínua) das concentrações de CO<sub>2</sub> ao longo dos anos (barras em cinza representam o início e o fim dos anos ímpares). Os pontos representam as médias mensais das concentrações em ambos os sítios. E o sombreado, representa o intervalo de confiança de 95% entre a variabilidade dos dados.

A Figura 23, apresentou não só um comportamento distinto para os sítios (tendência de aumento para o IAG e formato de “dente de serra” para o SPJ), como mostrou uma diferença significativa na variabilidade dos dados. Quando se analisa os desvios padrões (Tabela 7) em ambas as séries, ficou evidente que as concentrações no sítio do IAG variam muito mais ao longo da série temporal, do que as concentrações medidas no SPJ, corroborando, não só, com a hipótese de que as concentrações medidas no IAG sofrem influência de mais fontes emissoras de CO<sub>2</sub> do que o SPJ, como também com a hipótese de que as fontes presentes no SPJ, seriam mais constantes e que podem não sofrer tanta influência de emissões antrópicas.

Tabela 7 - Concentrações do CO<sub>2</sub> médias, mínimas, máximas e o desvio padrão para ambos os sítios, incluindo todos os anos de coleta. As análises foram aplicadas para a média horária dos dados.

Concentrações do CO <sub>2</sub> em ppm considerando os finais de semana								
Sítios	Média	Valor Mínimo	Data	Hora	Valor Máximo	Data	Hora	Desvio Padrão
SPJ	416,35	390,91	05/01/2017	09:00:00	458,51	14/04/2016	06:00:00	10,23
IAG	421,34	374,89	17/11/2016	13:00:00	510,57	31/08/2019	05:00:00	21,81
Concentrações do CO <sub>2</sub> em ppm sem considera os finais de semana								
	Média	Valor Mínimo	Data	Hora	Valor Máximo	Data	Hora	Desvio Padrão
SPJ	416,77	390,91	05/01/2017	09:00:00	458,51	14/04/2016	06:00:00	10,27
IAG	422,12	374,89	17/11/2016	13:00:00	510,42	19/06/2019	06:00:00	21,85

Na tabela 7, são apresentadas não só as informações de médias, mínimas, máximas e os desvios padrões de cada série, como também os dias e os horários em que cada concentração máxima e mínima ocorre, afim de identificar possíveis padrões preliminares da variabilidade das concentrações de CO<sub>2</sub>. Também foram incluídos na tabela os dados das concentrações filtradas para conter apenas os dias de semana, uma vez que os finais de semana podem conter variabilidades próprias (como por exemplo, menos fluxos de carros circulando nas ruas, ou aumento no trânsito devido a volta de veículos para a capital) que podem impactar nas análises e nas possíveis identificações de fontes emissoras. Tal hipótese ficou comprovada quando analisamos os valores das médias e desvios padrões em ambos os sítios com e sem os finais de semana, enquanto as concentrações no sítio do IAG registraram uma média de  $421,34 \pm 21,81$  ppm ao longo da série completa, sem os fins de semana essa média subiu para  $422,12 \pm 21,85$  ppm, totalizando um aumento de quase 1 ppm na concentração média da série temporal completa. O mesmo padrão foi observado para o SPJ, embora a diferença neste sítio tenha sido bem menor ( $\sim 0,4$  ppm).

Outro fator que merece ser discutido se refere aos horários em que os valores mínimos e máximos ocorreram em ambos os sítios. Chama a atenção o fato de que os valores máximos das concentrações ocorrem sempre nas primeiras horas da manhã, identificadas como o horário de ocorrência do maior pico do trânsito na cidade de São Paulo (CETESB, 2020b). Já as mínimas não registraram o mesmo padrão observado para as máximas. Este fato pode estar ligado a duas hipóteses distintas, sendo a primeira correlacionada com a quantidade de dados faltantes presentes na série temporal do SPJ, o que poderia estar influenciando nestas diferenças entre os horários em que ocorreram os valores mínimos. Já a segunda hipótese está correlacionada com a possível influência das variáveis meteorológicas nos transportes das concentrações ou na melhor mistura dos gases devido à altura da camada limite planetária

(CLP) (Ribeiro *et al.*, 2018; Verhulst *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2010; Xueref-Remy *et al.*, 2018). A fim de buscar uma melhor resposta para estas hipóteses, as análises das concentrações foram restringidas ao ano de 2019, que como observado na Figura 22, foi o ano que apresentou a maior quantidade de dados, em ambos os sítios, simultaneamente.

## 6.2. Concentrações do CO<sub>2</sub> para o ano de 2019

Assim como no tópico anterior, as concentrações de CO<sub>2</sub> para ambos os sítios foram colocadas na Figura 24, para facilitar algumas observações preliminares sobre as concentrações medidas. Nota-se que os maiores valores de concentrações, bem como as maiores amplitudes entre os valores máximos e mínimos das concentrações, foram registradas no sítio IAG, enquanto o SPJ apresenta variabilidades diárias menos evidentes, corroborando com a discussão do tópico anterior, de que as concentrações neste sítio sofrem menos influências externas.

Série temporal completa do CO<sub>2</sub> para o ambos os sitios - ano 2019

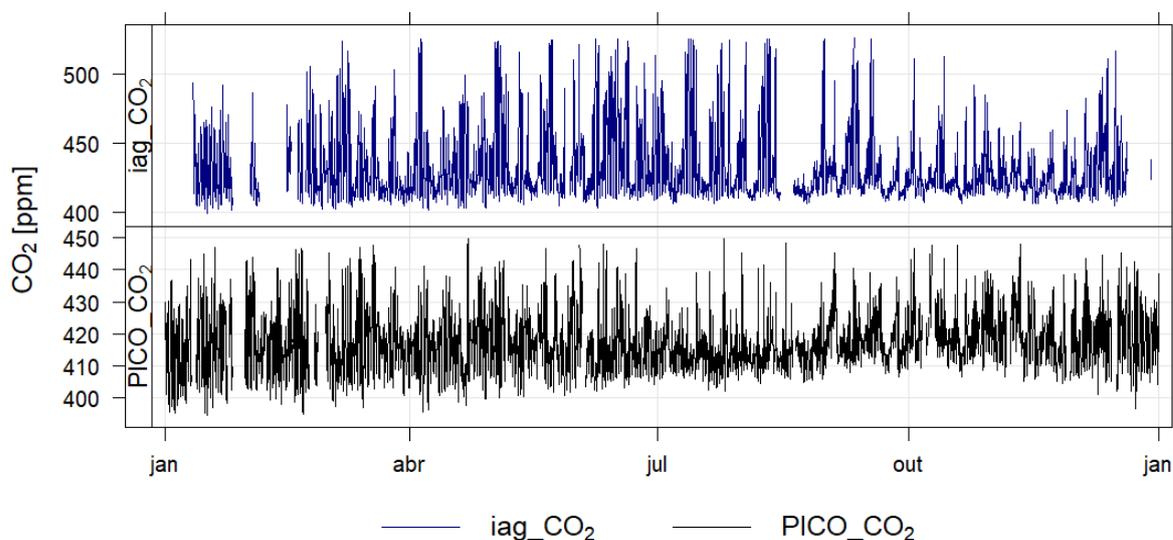


Figura 24 - Série temporal das concentrações de CO<sub>2</sub> em ambos os sítios para o ano de 2019. Os dados das concentrações encontram-se em ppm e foram ajustadas em médias por minuto.

Vários pontos importantes conseguem ser observados e discutidos analisando esta Figura 24. Por exemplo, em ambos os sítios as concentrações apresentam um comportamento de “dente de serra”, o que dá indícios de que em algumas horas dos dias existe um forte sumidouro de CO<sub>2</sub> na cidade de São Paulo. Os sumidouros, estão relacionados com centros verdes, que permeiam a cidade, muito mais presentes, inclusive, no SPJ, como pode ser visto

na Figura 20. Os centros verdes sequestram uma quantidade considerável de CO<sub>2</sub> durante o processo de fotossíntese, que ocorrem com maior atividade durante os meses da primavera e do verão (Beer *et al.*, 2010; Ciaís *et al.*, 2013). Outros fatores que podem ajudar na dispersão e, por consequência, na diminuição das concentrações do CO<sub>2</sub> as variáveis meteorológicas que influenciam na altura da CLP, como a temperatura e a velocidade do vento (Verhulst *et al.*, 2017; Xueref-Remy *et al.*, 2018).

O segundo ponto observado na Figura 24, foi que diferentemente da Figura 23, o sítio do IAG não apresenta uma clara tendência de aumento, já o SPJ tem essa tendência de aumento ao longo do ano bem mais expressiva do que o apresentado no tópico anterior. Este padrão nas tendências em ambos os sítios fica ainda mais evidente quando analisamos a Figura 25. Nela foi possível identificar que a curva do CO<sub>2</sub> durante o ano de 2019, no sítio do IAG apresenta um comportamento muito mais sazonal, isto é, com variabilidades que estão mais associadas com a influência das variáveis meteorológicas. Já o SPJ, apresenta uma linha mais suave, do que a do sítio do IAG, com exceção dos meses referentes ao início da primavera e verão austral, onde observa-se uma clara tendência no aumento das concentrações neste sítio de coleta.

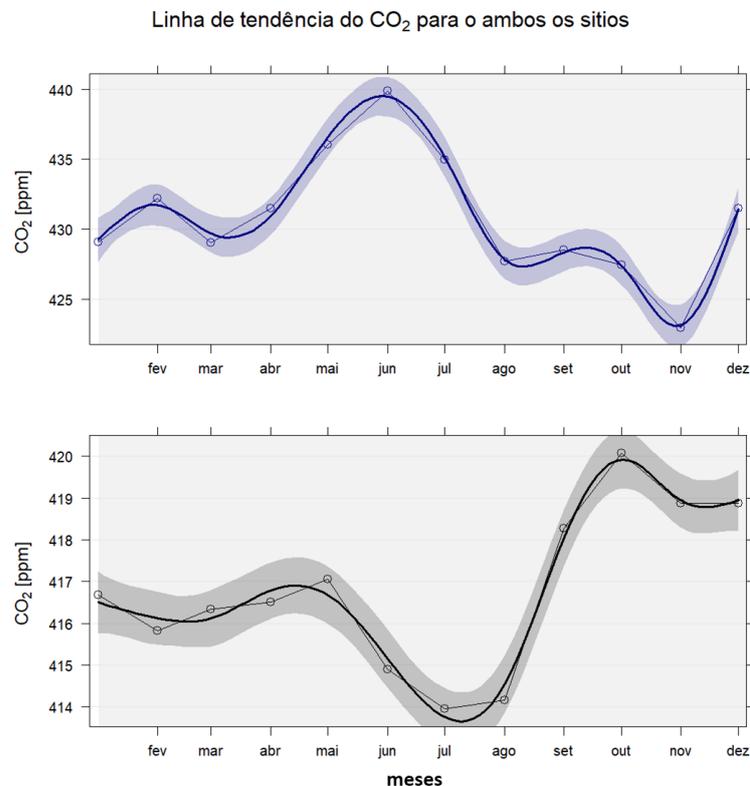


Figura 25 - Linha de tendência (linha contínua) das concentrações de CO<sub>2</sub> no ano de 2019. Os pontos representam as médias mensais. E o sombreado, representa o intervalo de confiança de 95% para o ajuste da variabilidade dos dados.

As Figuras 24 e 25, deixaram ainda mais evidentes as concentrações superiores medidas no sítio do IAG, quando comparadas com as concentrações do SPJ, em todo o ano de 2019. Este fato indica, que as fontes emissoras de CO<sub>2</sub> próximas ao sítio do IAG são mais significativas do que as que atuam próximas ao SPJ, e os sorvedouros menos atuantes.

Por fim, alguns questionamentos foram levantados sobre os perfis das variabilidades interanuais entre os dois postos, como por exemplo, as causas para as concentrações no SPJ apresentarem um aumento a partir do mês de setembro. Ou porque as concentrações do IAG apresentam uma diminuição nas concentrações durante o mês de novembro. Ou ainda o porquê das concentrações mínimas no SPJ ocorre no mesmo período que as concentrações no IAG foram mais altas.

A fim de tentar entender melhor os comportamentos das concentrações de CO<sub>2</sub> nos sítios durante o ano de 2019, foram calculados os valores de concentração média por minuto (apresentados na tabela 8). Essa tabela permite uma comparação com os valores obtidos na tabela 7, que contém os dados de toda a série temporal disponível. No entanto, é preciso ponderar que a tabela do tópico anterior foi elaborada com as concentrações do CO<sub>2</sub> em médias horárias, devido à alta densidade dos dados, tornou-se inviável trabalhar com os dados por minuto e por isto, algumas diferenças entre as informações presentes em ambas as tabelas precisam ser analisadas com mais cautela.

*Tabela 8 - Concentrações do CO<sub>2</sub> médias, mínimas, máximas e o desvio padrão para ambos os sítios, no ano de 2019. As análises foram aplicadas para a média por minuto dos dados.*

<b>Concentrações do CO<sub>2</sub> em ppm considerando os finais de semana</b>								
<b>Sítios</b>	<b>Média</b>	<b>Valor Mínimo</b>	<b>Data</b>	<b>Hora</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Data</b>	<b>Hora</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>SPJ</b>	416,74	394,49	16/01/2019	13:32:00	450,43	14/10/2019	04:38:00	8,70
<b>IAG</b>	430,90	396,08	16/01/2019	13:16:00	526,66	07/03/2019	02:18:00	23,32
<b>Concentrações do CO<sub>2</sub> em ppm sem considerar os finais de semana</b>								
	<b>Média</b>	<b>Valor Mínimo</b>	<b>Data</b>	<b>Hora</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Data</b>	<b>Hora</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>SPJ</b>	417,00	394,49	16/01/2019	13:32:00	450,43	14/10/2019	04:38:00	8,75
<b>IAG</b>	431,46	396,08	16/01/2019	13:16:00	526,66	07/03/2019	02:18:00	22,88

O primeiro destaque a ser feito sobre as concentrações presentes na tabela 8 refere-se à diferença entre as concentrações médias do IAG entre o ano de 2019 e o ano de 2014<sup>3</sup>. Quando compara-se as médias horárias das concentrações de CO<sub>2</sub> no sítio do IAG, no ano de 2014 (417,32 ppm) com as concentrações médias horárias para o ano de 2019 (430,9 ppm), nota-se um aumento de 13,58 ppm na média anual, o que corresponde a uma diferença, em termos percentuais, de ~ 3,3%. Para o SPJ, não foi possível realizar esta comparação devido à quantidade de dados faltantes presentes na série temporal.

Outra informação retirada desta tabela refere-se à diferença entre as concentrações médias nos dois sítios de coleta. Enquanto o IAG registrou um valor médio de  $431,5 \pm 22,9$  ppm o SPJ registrou uma média de  $417,0 \pm 8,8$  ppm, para a série temporal que não leva em consideração os finais de semana. Esta diferença implica que as concentrações médias do IAG foram 3,47% maiores do que as concentrações médias de CO<sub>2</sub> do SPJ. Indicando mais uma vez a presença de fontes/sorvedouros e processos meteorológicos diferentes entre os dois sítios. Outro destaque pertinente se deu ao fato de que os valores referentes ao SPJ foram inferiores aos do IAG em todas as análises estatísticas preliminares, podendo ser associado a alguns fatores que já foram identificados por outros autores (Fang *et al.*, 2014; Xueref-Remy *et al.*, 2018), como: emissões biogênicas e altura elevada do sítio de coleta. Reforça esta teoria a diferença entre os desvios padrões calculados para cada sítio. Observou-se a existência de uma variabilidade maior nas concentrações de poluentes medidos no IAG se comparada com o desvio padrão referente ao SPJ, indicando que o sítio do IAG sofre mais influência de fontes dinâmicas, como o tráfego de veículos (Verhulst *et al.*, 2017). Por fim, notou-se que as diferenças entre os valores mínimos (0,4%) e máximos (16,92%) em ambos os sítios, apresentaram comportamentos similares entre a série temporal completa e a série sem considerar os finais de semana. Este foi o principal indício para acreditar que as fontes antrópicas predominantes na cidade de São Paulo estavam correlacionadas com emissões veiculares, uma vez que os maiores picos de tráfego de veículos ocorrem nos dias de semana, salvo os dias em que se faz necessária a realização de manutenções nas vias públicas (CETESB, 2017b, 2020b).

---

<sup>3</sup> Escolha do ano referência com base na menor quantidade de dados faltantes da série temporal do sítio do IAG

Comparando os resultados obtidos para esta pesquisa com os resultados evidenciados por outros pesquisadores que realizaram a mesma abordagem, notou-se que as concentrações medidas no sítio do IAG, foram em geral, 0,53 ppm (-0,12%), mais baixas que as concentrações médias registradas no trabalho da MCP<sub>LA</sub> (Verhulst *et al.*, 2017). Já para o SPJ esta diferença foi de 13,19 ppm (3,4% maior), quando comparados os sítios que apresentam o mesmo comportamento de variabilidade nas medidas. No entanto, para os trabalhos publicados por autoras(es), como: Wang *et al.*, 2010 que estudou as correlações de CO<sub>2</sub> e CO na cidade de Beijing - China e Xueref-Remy *et al.*, 2018 que estudou as variabilidades sazonais do CO<sub>2</sub> em Paris – França, apresentaram valores de concentrações médios inferiores aos registrados na cidade de São Paulo.

A Figura 26 contempla a variabilidade do CO<sub>2</sub> média horária por dias da semana, média mensal, e por dias da semana para o ano de 2019 para os dois sítios.

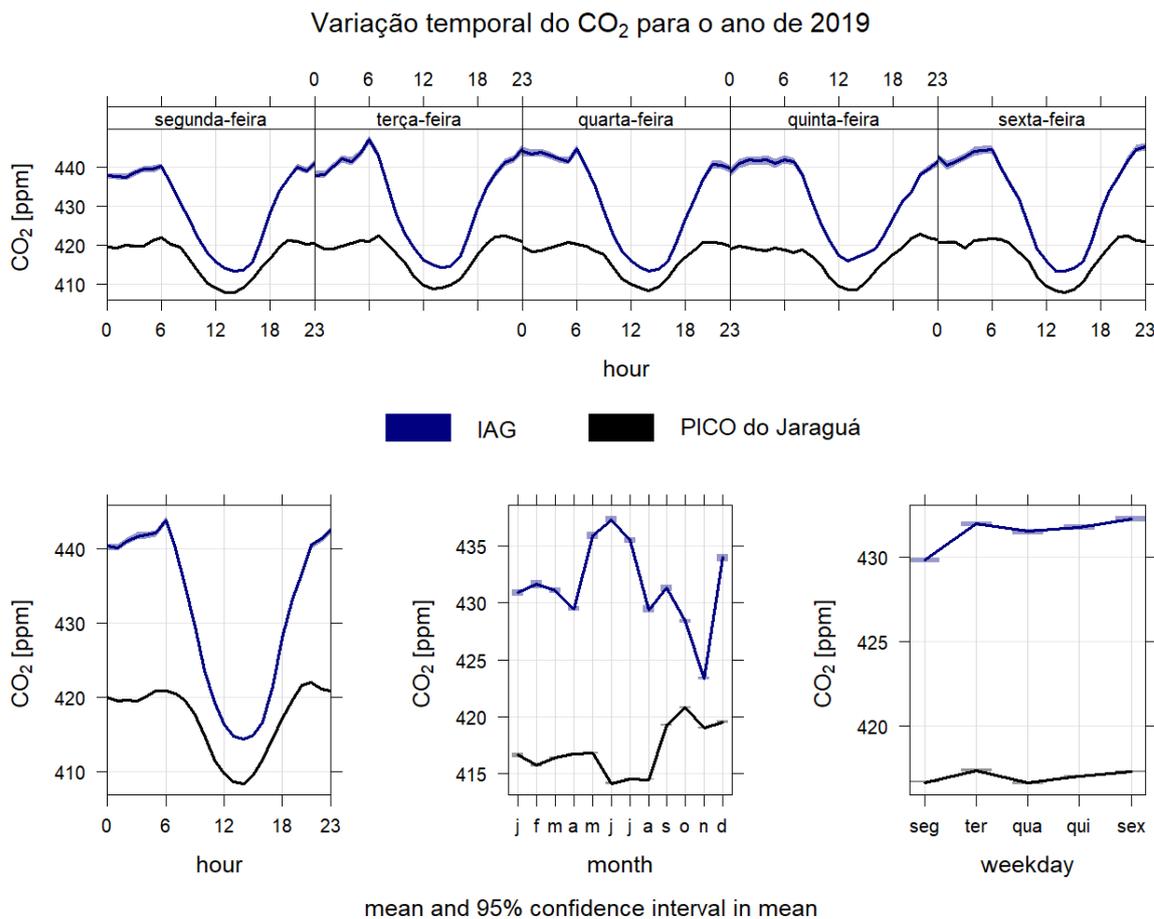


Figura 26 - Variações das concentrações de CO<sub>2</sub> horárias para os dias da semana, para o perfil horário do dia e a variação mensal, para ambos os sítios (em ppm)

Ao se analisar a Figura 26, pode-se observar alguns pontos que corroboram com o que foi dito anteriormente. As concentrações de CO<sub>2</sub> no IAG, por exemplo, ficaram, superiores às

concentrações do SPJ, ao longo de todo o ano de 2019. Sendo que, a principal hipótese para este comportamento, já foi discutida anteriormente, se deve ao fato do sítio do IAG sofrer maiores influências de fontes antropogênicas provenientes do intenso tráfego de veículos. Com isto, seria possível atribuir as emissões de CO<sub>2</sub> veiculares como a principal fonte responsável pela variabilidade das medidas no IAG. A fim de comprovar essa hipótese, será apresentada uma sessão nos próximos capítulos com uma abordagem mais aprofundada sobre essa questão.

Outros fatores importantes a serem observados na Figura 26, foram os pontos de mínimos de “concentrações” do CO<sub>2</sub> em ambos os sítios. Vários autores atribuem estes mínimos com a fase máxima de fotossíntese (sumidouros de CO<sub>2</sub>), somados com a diminuição de tráfego nas vias (Apadula *et al.*, 2003; Breón *et al.*, 2015; Verhulst *et al.*, 2017; Xueref-Remy *et al.*, 2018). Sendo assim, o que vemos na Figura 26 corrobora com que foi destacado pelos autores anteriores: o mínimo de CO<sub>2</sub> ocorreu no momento de menor tráfego veicular nas vias (CETESB, 2020b), e aproximadamente no momento de maior temperatura do ar (Ribeiro *et al.*, 2018).

As concentrações de CO<sub>2</sub> em ambos os sítios apresentaram um comportamento, quase que uniforme em todos os dias da semana, porém, as menores concentrações no sítio do IAG, foram registradas na segunda-feira e no domingo (vide Anexo II). Já as concentrações no SPJ, apresentaram os menores valores durante os finais de semana (vide Anexo II). Como destacado pela CETESB, 2020, os finais de semana apresentam os menores índices de tráfego, o que justifica o comportamento nas emissões do SPJ. No sítio do IAG as concentrações no sábado apresentaram uma leve diminuição em relação as concentrações medidas durante os dias da semana (com exceção da segunda-feira), já o domingo apresentou as menores médias nas concentrações do que todos os outros dias, que corrobora com a diminuição do tráfego de veículos nas vias próximas ao sítio de coleta. Porém, com os valores mínimos na segunda-feira e não ao sábado indicam que o sítio do IAG, possa ter a influência de outras fontes de emissões ou de que, para esta localidade, o perfil do trânsito possa variar de forma diferente do que o apresentado no estudo divulgado pela CETESB, 2020. Estudar o perfil do trânsito local poderia dar uma resposta melhor sobre esta questão.

O perfil diário das concentrações em ambos os sítios apresentou uma variabilidade muito distinta. Enquanto o sítio do IAG, apresentou uma diferença de aproximadamente 25 ppm, entre a concentração máxima e a concentração mínima. O SPJ apresentou uma variabilidade de aproximadamente 12 ppm. Estas diferenças também foram estudadas por outros autores e poderiam estar correlacionadas, não só com a diferença de fontes atuantes nos locais de medições, como também com o perfil da CLP para a cidade de São Paulo, devido à elevação em que a estação do SPJ se encontra (~1080 m acima do nível do mar e 349 m acima

do sítio de coleta do IAG) (Xueref-Remy *et al.*, 2018). Verhulst *et al.*, 2017, destacou que as diferenças nas observações de CO<sub>2</sub> também são mais sensíveis às fontes locais quando a CLP é mais baixa e a atmosfera é menos misturada (horários noturnos e/ou em baixas velocidades de vento). A altura do CLP também pode variar com a estação do ano. O autor citado destacou que em uma estação de coleta de CO<sub>2</sub> presente no MCP<sub>LA</sub>, a CLP apresentou comportamentos bem definidos durante os meses de primavera e verão devido à fortes inversões de temperatura associadas à subsidência em grande escala (Verhulst *et al.*, 2017). Porém, durante o outono e inverno, a subsidência em grande escala é menos proeminente e a presença de uma fraca inversão de temperatura (ou que se estende até perto da superfície) torna mais difícil identificar uma camada limite (Verhulst *et al.*, 2017). Na cidade de São Paulo, um estudo publicado por Ribeiro *et al.*, 2018, concluiu que o perfil da CLP durante os meses referentes ao verão possui um rápido desenvolvimento vertical variando de 750 m de altura as 1200 HL, para 1750 m às 1500 HL e às 1800 HL, a CLP já retornaria para uma altura de aproximadamente 500 m. No inverno, esta variabilidade no perfil da CLP, foi menor, segundo o autor a CLP apresentou o valor de, aproximadamente, 500 m as 1200 HL, as 1500 HL a altura chegou a medir 1500 m acima da superfície, e retornando para 500 m de altura ao atingir o horário de 1800 LT. Entender os perfis do vento, da temperatura e do desenvolvimento da CLP na cidade de São Paulo, podem ajudar nas discussões, acerca das variabilidades sazonais registradas em ambos os sítios (Figura 26). Por este motivo, será apresentado neste trabalho um tópico referente as influências das variáveis meteorológicas nas concentrações de CO<sub>2</sub>.

### **6.2.1. Influência das variáveis meteorológicas nas concentrações de CO<sub>2</sub>**

Neste tópico serão discutidas as possíveis influências das variáveis meteorológicas nas concentrações medidas em ambos os sítios de coleta. Para isto, foram elaboradas correlações entre a concentração de CO<sub>2</sub> e as variáveis do vento e temperatura. Além de um estudo separado para possíveis influências da precipitação na diminuição das concentrações medidas no sítio do IAG durante o mês de novembro como evidenciado na Figura 26.

#### **6.2.1.1. Velocidade e direção do Vento**

Levantado por tantos autores: Ciais *et al.*, 2013; Fang *et al.*, 2014; Verhulst *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2010; Xueref-Remy *et al.*, 2018, a velocidade e direção do vento podem impactar diretamente nas concentrações de CO<sub>2</sub> medidas em ambos os sítios. Seja pelo transporte das

concentrações de sítios mais urbanos para sítios mais afastados, ou pelo aumento das concentrações devido à velocidades do vento mais baixas, dificultando assim a dispersão das concentrações.

Para a melhor compreensão desse efeito foi gerada a Figura 27, que exhibe o perfil da velocidade e direção dos ventos ao longo do ano em ambos os sítios de coleta.

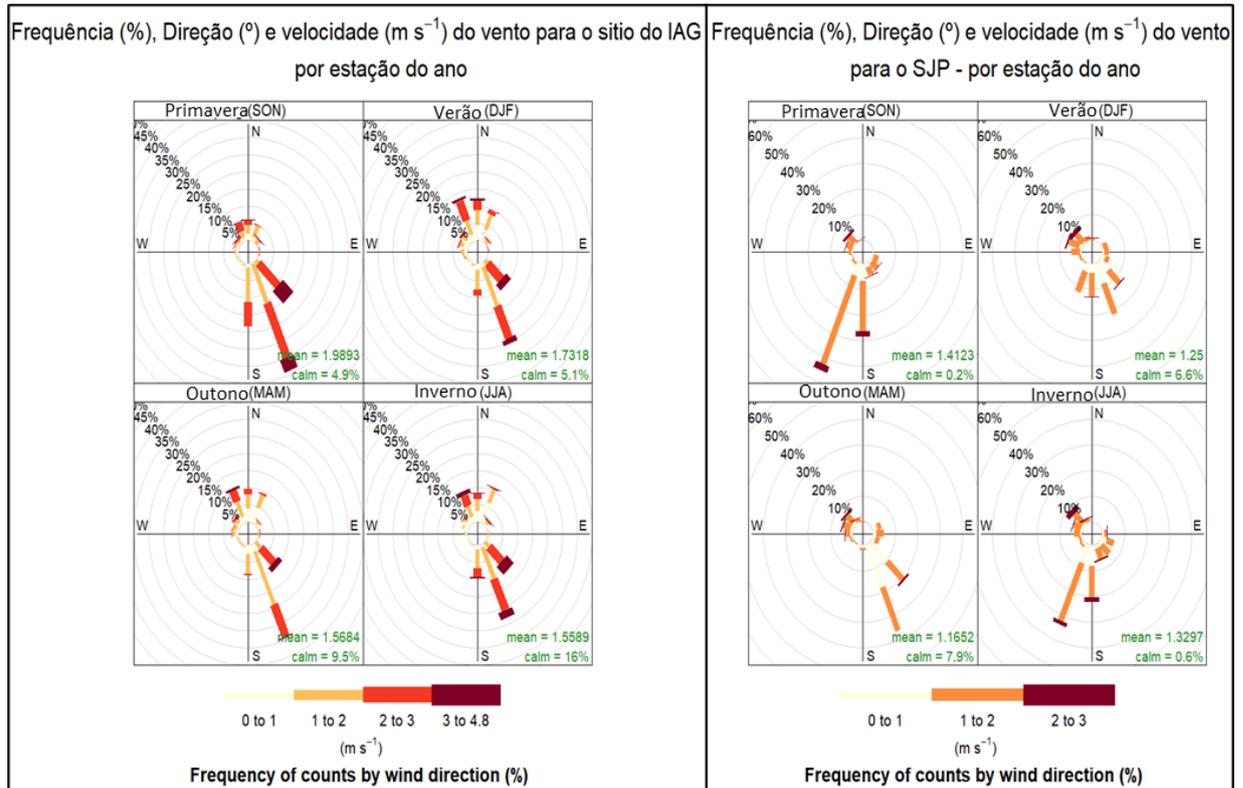


Figura 27 - Frequência, direção e velocidade do vento para os sítios do IAG (à esquerda) e SPJ (à direita), dividida por estação do ano.

Analisando a Figura 27, foi possível identificar que para o sítio do IAG o perfil dos ventos sofre uma importante influência da circulação de Brisa Marítima (BM), devido à predominância de ventos do quadrante S-SE (Ribeiro *et al.*, 2018). Já para o SPJ, por ser mais afastado, apresentou esta influência apenas durante os meses de outono, enquanto os padrões dos ventos durante a primavera e o inverno apresentam uma predominância dos ventos referentes aos quadrantes de NO e S. Este padrão foi estudado por Vemado, José e Filho, 2016, que investigaram os efeitos da ilha de calor (IC) e a circulação da BM na formação de sistemas convectivos. Foi discutido pelos autores o surgimento de um fluxo de vento de NO devido à atuação da IC sobre a RMSP. Outro destaque feito pelos autores foi em relação aos fluxos de vento de NO gerados pelas passagens de sistemas frontais, onde esses ventos foram predominantes durante as zonas pré-frontais, ou seja, circulações dos ventos que se estabelecem antes da chegada de uma frente fria.

Analisando o perfil dos ventos predominantes em cada sítio foi possível estimar que as maiores concentrações de CO<sub>2</sub> seriam provenientes dos quadrantes de SE para o sítio do IAG e para o SPJ as maiores concentrações deveriam vir dos quadrantes S-NO (na primavera e inverno) e dos quadrantes de SE para o outono. A Figura 28 representa a direção da propagação do vento, qual a concentração que é atribuída a essa direção e qual a frequência que estes fatores se sobrepõem.

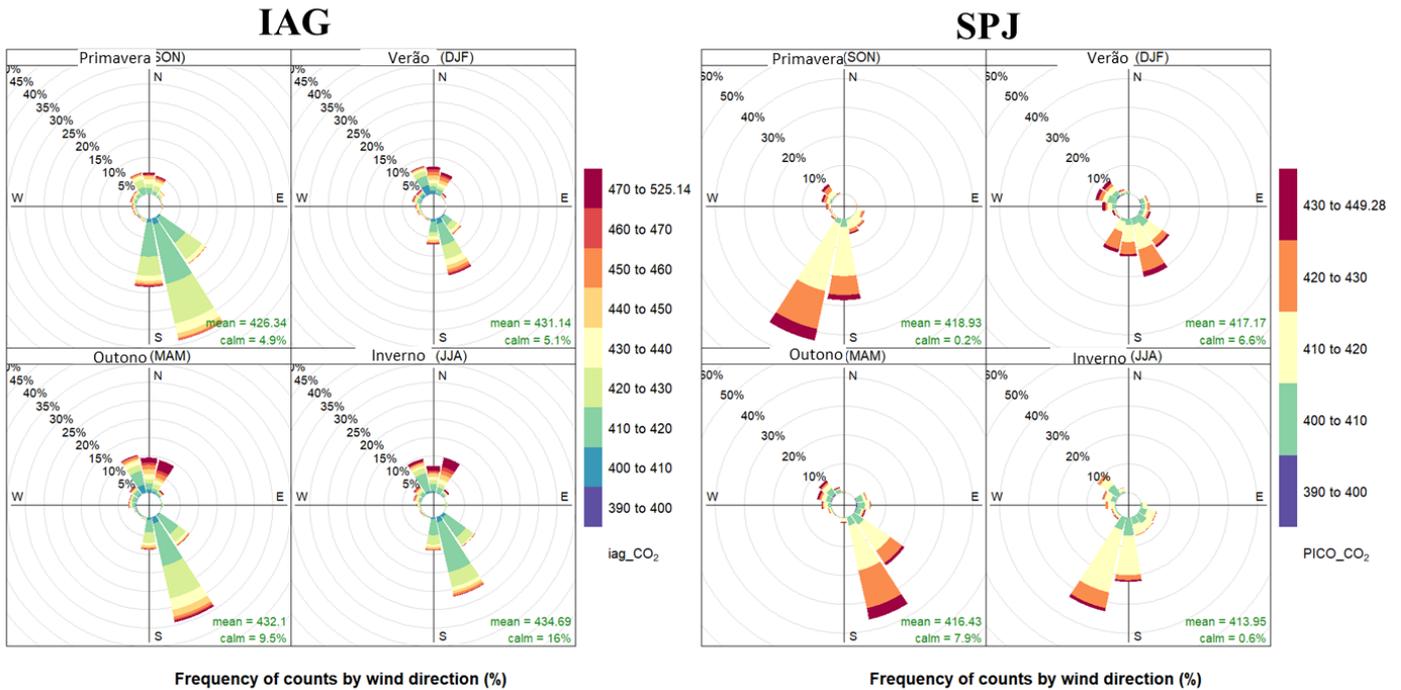


Figura 28 - Direção, frequência e concentrações de CO<sub>2</sub> atribuídas a cada sítio de coleta ao longo do ano de 2019. As concentrações de CO<sub>2</sub> encontram-se em ppm e foram divididas por cada estação do ano.

Como esperado, as maiores concentrações no sítio do IAG foram medidas durante os meses de outono e inverno, devido à velocidade dos ventos serem menores, o que prejudica a dispersão do CO<sub>2</sub>. Isto foi discutido no trabalho de autores como Xueref-Remy *et al.*, 2018, onde analisou-se que ventos menores que 3 m s<sup>-1</sup> eram incapazes de transportar as concentrações de CO<sub>2</sub> provenientes de fontes veiculares, para longas distâncias. Com isto, os autores notaram a formação de domos de CO<sub>2</sub> sobre os sítios de coleta. Estes domos eram gerados pela junção de dois fatores: sendo o primeiro a baixa velocidade do vento e o segundo o baixo desenvolvimento da CLP, com isto as concentrações não se dissipavam e nem se diluíam em fluxos turbulentos. Como comprovação desta teoria os autores investigaram os sítios mais afastados e notaram que as concentrações de CO<sub>2</sub> eram mais baixas do que o de costume quando a velocidade dos ventos era superior a velocidade analisada pelo autor. Isto se mostrou verdade para o sítio do IAG, onde as maiores concentrações foram medidas durante os meses do inverno (concentração média de 436,43 ± 27,1 ppm (Tabela 9)), enquanto o SPJ

registrou as menores concentrações (concentração média de  $414,24 \pm 6,8$  ppm). Implicando que as concentrações médias do CO<sub>2</sub> no sítio do IAG foram 5% maiores que as concentrações médias no SPJ durante a estação do inverno.

Para tentar descrever melhor as influências da velocidade do vento nas concentrações medidas em ambos os sítios foram elaboradas duas Figuras (sendo uma a Figura 29 e a outra está contida no Anexo II), que consistem na representação da correlação horária entre a velocidade do vento e a concentração medida no sítio do IAG. Para o SPJ foi elaborada a mesma Figura, no entanto está se encontra no anexo III.

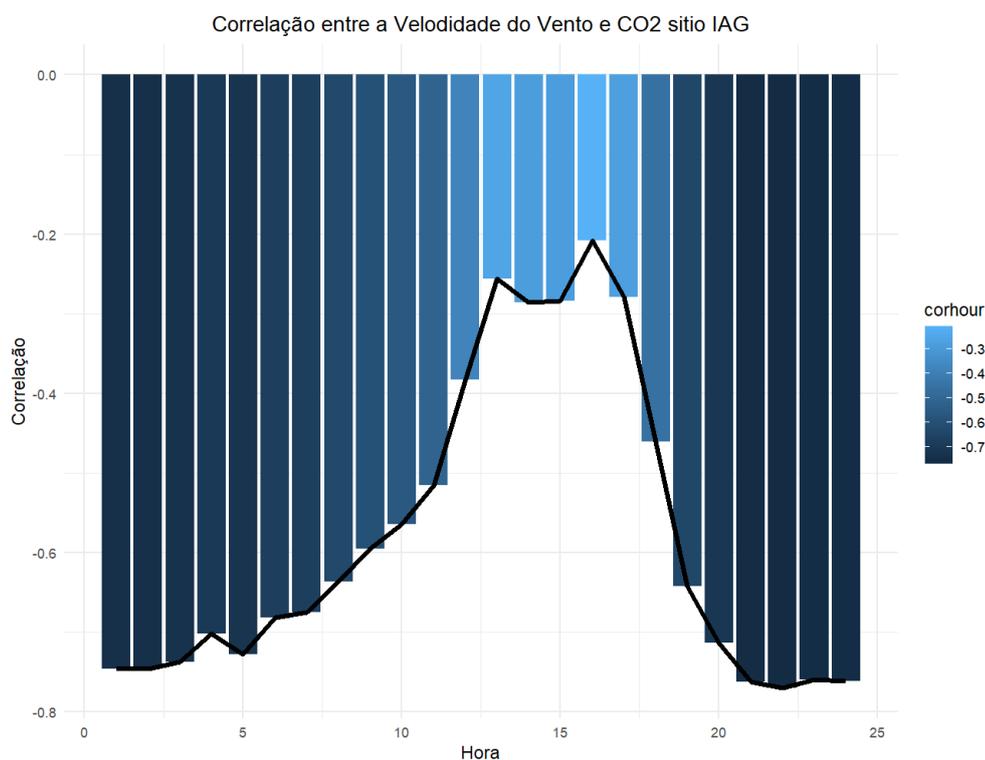


Figura 29 - Correlação horária da velocidade do vento (em  $m s^{-1}$ ) versus a concentração de CO<sub>2</sub> no sítio do IAG (para todos os dados do ano de 2019)

A influência da velocidade do vento nas concentrações do CO<sub>2</sub> medido no sítio do IAG pode ser observada na Figura 29. Assim como abordado acima, onde foi destacado que em velocidades menores foram encontradas as maiores concentrações, esperava-se que quanto maior fosse a velocidade do vento, menor fossem as concentrações de CO<sub>2</sub> medidas em ambos os sítios, ou seja, uma correlação inversamente proporcional a velocidade do vento. O que se mostrou verdadeiro, com valores de correlação superiores a -0,7, com um nível de significância de  $p > 0,001$ . As correlações começam a diminuir no começo da manhã e atingem um mínimo de correlação (-0,3) nos horários em que se espera as maiores temperaturas. Isto indica que as concentrações de CO<sub>2</sub>, no sítio do IAG, podem sofrer influências de sumidouros de concentração. Importante ressaltar que as concentrações mínimas de CO<sub>2</sub> em ambos os sítios

foram registradas nos mesmos horários que a correlação com o vento diminuiu. Para comprovar esta teoria será apresentado um tópico sobre as correlações do CO<sub>2</sub> e a temperatura.

O SPJ não apresentou o mesmo perfil de correlação que o sítio do IAG, onde a maior correlação encontrada foi aproximadamente -0,3, com um nível de significância de  $p > 0,001$ , o que sugere que as fontes de emissões de CO<sub>2</sub> neste sítio sejam maiores durante a noite. Destaca-se também, que o SPJ está cercado por uma área de reserva ambiental, com grandes árvores em seu entorno e com uma elevação de, aproximadamente, 800 m das vias de tráfego mais próximas (CETESB, 2020b). Outro fator que corrobora com a hipótese de que parte das emissões de CO<sub>2</sub> no SPJ sejam de origens biogênicas, está no fato de que os maiores valores de correlação se deram nos horários noturnos, onde a vegetação encontra-se emitindo CO<sub>2</sub> devido ao seu processo natural de respiração (Beer *et al.*, 2010). Verhulst *et al.*, 2017, destacou em seu trabalho a importância de se estudar as correlações do CO<sub>2</sub> com concentrações de CH<sub>4</sub> para tentar identificar fontes biogênicas de CO<sub>2</sub>. Neste trabalho, a tentativa de identificar estas fontes se deu pelas correlações de CO<sub>2</sub> no SPJ com a temperatura, que será apresentada no tópico a seguir

Na tabela 9 estão contidas as variabilidades das concentrações de CO<sub>2</sub> para o ano de 2019, filtradas para cada estação do ano a fim de verificar se os máximos de concentração identificados na Figura 29, estão relacionadas com as estações do ano. Importante destacar que os resultados dispostos na tabela não levam em consideração as emissões de CO<sub>2</sub> durante os finais de semana.

*Tabela 9 - Concentrações médias, máximas, mínimas e desvio padrão de CO<sub>2</sub> (em ppm) em ambos os sítios de coleta, separados por estação do ano. Todos os valores não levam em consideração as concentrações medidas durante os fins de semana*

Sítios	Primavera				Verão			
	Média	Desvio P.	Máximo	Mínimo	Média	Desvio P.	Máximo	Mínimo
IAG	428,64	18,29	523,41	406,30	432,53	21,70	516,91	398,60
SPJ	420,15	7,44	449,08	405,20	417,59	10,08	448,30	394,87
Diferença <sup>1</sup> Média	8,50			14,95				
Sítios	Outono				Inverno			
	Média	Desvio P.	Máximo	Mínimo	Média	Desvio P.	Máximo	Mínimo
IAG	430,80	22,89	524,21	401,81	436,43	27,06	525,14	406,66
SPJ	416,73	8,95	448,91	395,46	414,24	6,81	449,28	402,02
Diferença <sup>1</sup> Média	14,07			22,20				

<sup>1</sup>Diferença entre as concentrações (em ppm) médias do CO<sub>2</sub> medidas nos sítios de coleta para cada estação do ano

Além das concentrações do inverno, merece destaque as concentrações da primavera medidas no SPJ. Notou-se tanto na Figura 29, como na tabela acima que as maiores concentrações médias no SPJ foram observadas durante a estação da primavera, embora a maior concentração tenha sido registrada no período do inverno ( $449,28 \pm 6,81$  ppm). Porém, diferente do sítio do IAG, a estação do inverno no SPJ foi a que apresentou as menores variabilidades nas concentrações. Já a primavera, recebe maiores influências dos ventos de NO e apresenta a menor diferença entre as concentrações médias em ambos os sítios, o que pode indicar que durante o mês da primavera as concentrações no SPJ podem sofrer com influências do transporte de CO<sub>2</sub> proveniente do sítio do IAG. No entanto, nas seções a seguir essas questões serão discutidas.

#### **6.2.1.2. Correlações entre concentrações de CO<sub>2</sub> e Temperatura**

Este tópico foi criado na tentativa de correlacionar os mínimos de concentração de CO<sub>2</sub>, em ambos os sítios com sumidouros, provenientes de fontes biogênicas (áreas verdes próximas aos sítios do IAG e SPJ). Na Figura 30 são apresentadas as linhas de tendência do CO<sub>2</sub> e da temperatura para ambos os sítios. O destaque fica apenas para temperatura no sítio do IAG, sendo que neste caso foi utilizada a temperatura coletada no próprio sítio de coleta e não na estação de Qualidade do ar de Pinheiros como foi discutida no tópico de metodologias.

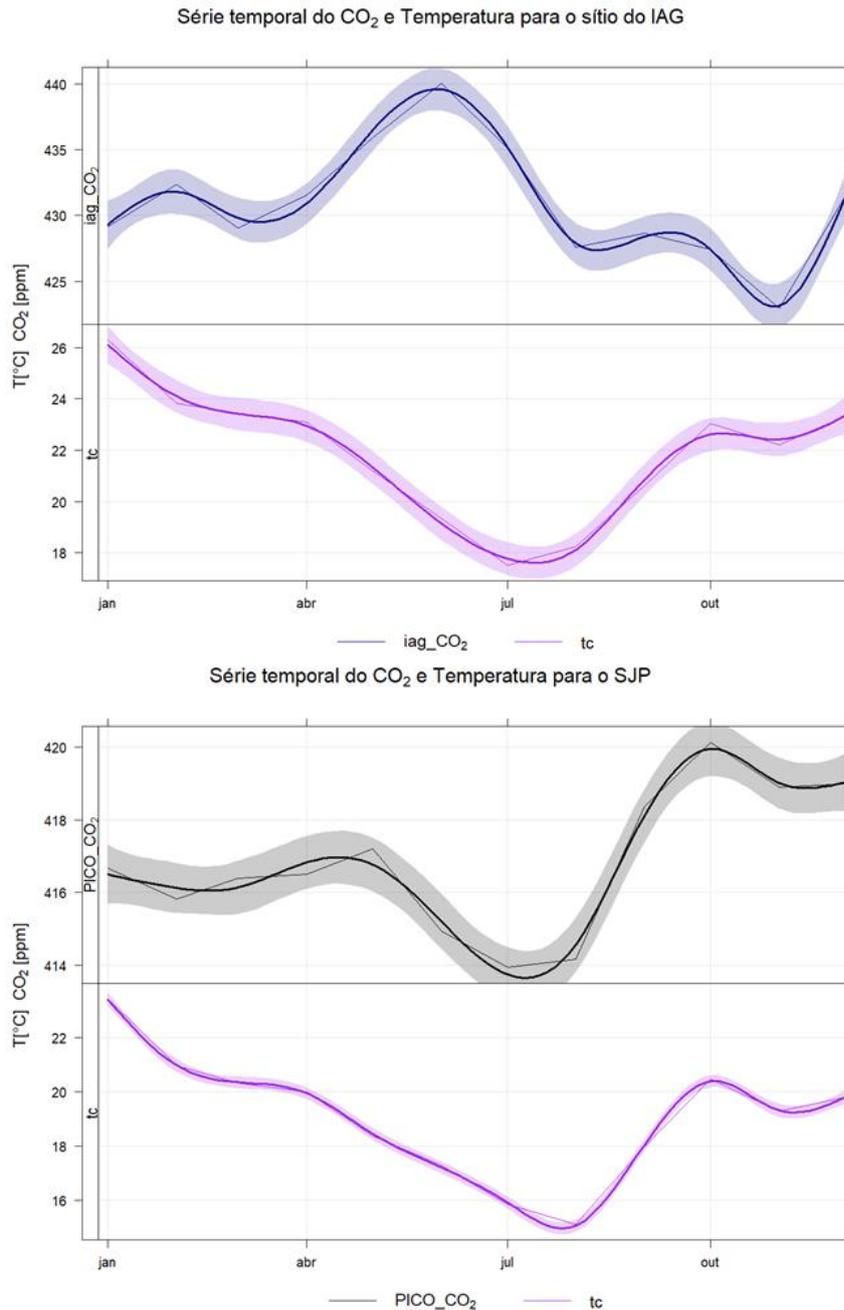


Figura 30 - Linhas de tendências das concentrações de CO<sub>2</sub> (em ppm) em ambos os sítios e as linhas de tendência da temperatura (em °C) medidas em ambos os sítios de coleta, para o ano de 2019.

Destaca-se que as linhas de tendência da temperatura apresentaram o mesmo padrão em ambos os sítios, no entanto, os valores de máximos e mínimos apresentaram algumas diferenças. Enquanto no sítio do IAG a variação da temperatura mínima (8,6 °C), registrada em toda a série temporal, e a máxima (38,3 °C) foi de 29,7 °C. O SPJ apresentou uma diferença de 26,9 °C, indicando que existiu uma diferença de, aproximadamente 2,7 °C entre as temperaturas medidas em ambos os sítios. Em outras palavras, foi possível notar que as temperaturas medidas no IAG, se mostraram até 2,7 °C maiores do que as registradas no SPJ.

Outro fator curioso que foi observado na Figura 30, que, enquanto a linha de tendência de CO<sub>2</sub> medida no sítio do IAG, mostrou um comportamento quase inverso à linha de tendência da temperatura medida no mesmo sítio. Para o SPJ, o padrão observado foi exatamente o oposto, tanto a linha de CO<sub>2</sub> quanto a de temperatura apresentaram aumentos e quedas quase que simultaneamente, indicando um padrão não esperado para esta localidade, uma vez que devido a atuação da fotossíntese esperava-se que as concentrações de CO<sub>2</sub> e as medidas de temperatura se mostrassem inversamente proporcionais. Esse comportamento pode ser visualizado nas Figuras 31 e 33, que consistem na correlação horária entre a temperatura e a concentração de CO<sub>2</sub> para ambos os sítios.

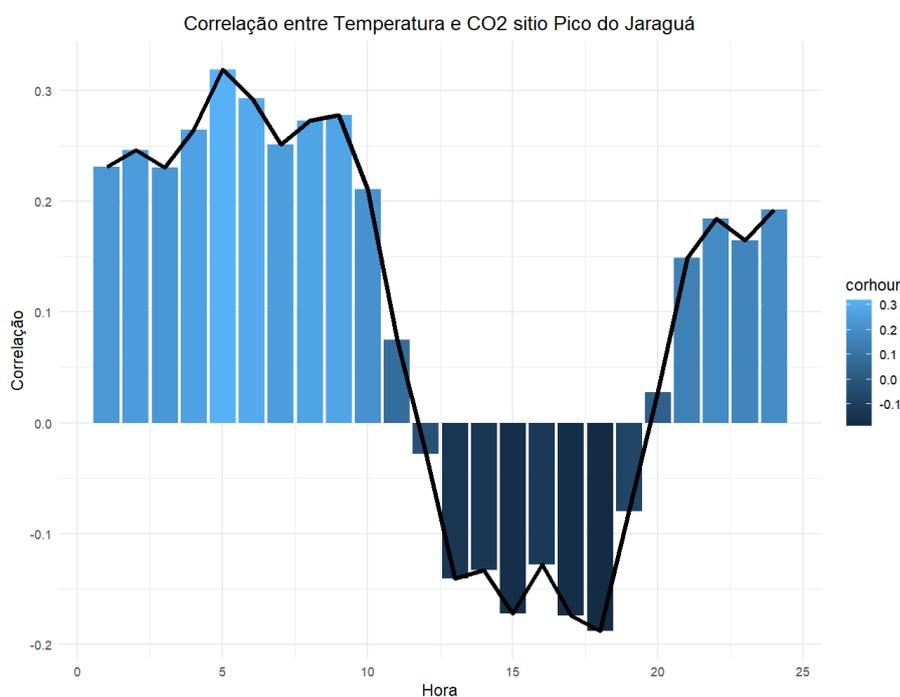


Figura 31 - Correlação horária entre as concentrações de CO<sub>2</sub> (em ppm) medidas no SPJ e a temperatura (em °C), com um nível de significância de  $p < 0,0002$

Analisando a Figura 31, notou-se que o perfil de correlações entre as concentrações de CO<sub>2</sub> e a temperatura, estão de acordo com o esperado, ou seja, em horários que a temperatura é mais elevada as concentrações de CO<sub>2</sub> são menores em função do máximo de fotossíntese (Beer *et al.*, 2010). No entanto, os valores baixos na correlação levantaram duas hipóteses distintas, sendo a primeira correlacionada a influência do transporte de CO<sub>2</sub> de outras localidades, logo, nem todo o poluente medido no sítio seria de influência biogênica o que explicaria a baixa correlação do CO<sub>2</sub> no SPJ com a temperatura medida no local. Esta hipótese será estudada na sessão a seguir.

A segunda hipótese estaria relacionada com a qualidade dos dados meteorológicos medidos neste sítio. Sabe-se que o SPJ possui diversas árvores no entorno da estação de coleta

como pode ser observado na Figura 20. Estas árvores podem acabar influenciando nos dados de temperatura devido à projeção de sombras sobre os termômetros que medem a temperatura no local. Para averiguar a confiabilidade dos dados calculou-se a correlação entre as concentrações de CO<sub>2</sub> medidas no SPJ e os valores de temperatura registradas na estação da CETESB da Pinheiros (Figura 32). Notou-se um aumento na correlação, com um nível de significância ainda maior que a encontrada quando utilizados os dados meteorológicos medidos diretamente no SPJ. Logo, a temperatura registrada no SPJ não pode ser usada como um traçador de emissões biogênicas e a distância entre o SPJ e a estação Pinheiros também torna esta variável pouco indicada para ser usada como um possível traçador destas fontes.

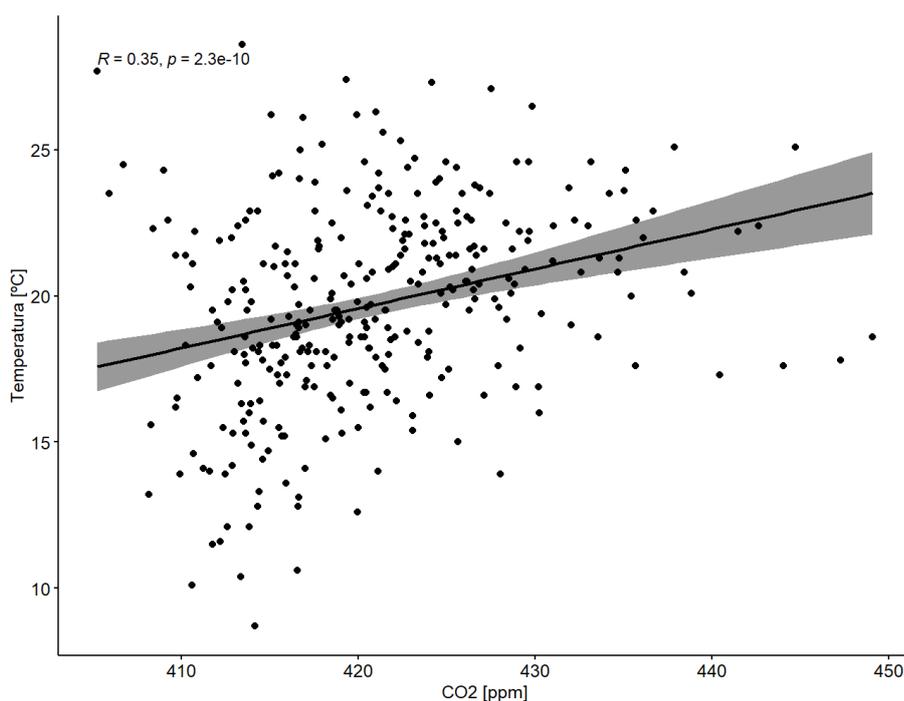


Figura 32 - Gráfico de dispersão de CO<sub>2</sub> (em ppm) medido no SPJ e da temperatura (em °C) medida na estação da CETESB em Pinheiros. A inclinação da reta mostra a tendência da correlação e o sombreado o nível de significância de 95%.

Outros fatores que podem influenciar nas concentrações de CO<sub>2</sub> sequestradas pela vegetação estão relacionadas com a estrutura do dossel<sup>4</sup> presente no entorno do SPJ, onde diferentes tipos de folhas, necessitam de diferentes tipos de irradiância solar para a realização da fotossíntese (Smith e Berry, 2013). Outros autores indicam que, em determinadas temperaturas, o dossel interrompe o processo de fotossíntese, para preservar a quantidade de

---

<sup>4</sup> Temo utilizado para definir conglomerados da mesma, ou de diversas espécies de plantas presentes no mesmo local.

água presente nas plantas (Kaiser *et al.*, 2017). Logo, para o SPJ, seria necessário um estudo mais detalhado não só com dados corretos da temperatura medida próximo ao sítio de coleta, como da irradiância solar atuante no sítio. Outros fatores podem ser usados como traçadores como as concentrações de CH<sub>4</sub> que se mostram um importante traçador de fontes biogênicas (Verhulst *et al.*, 2017; Viatte *et al.*, 2017). Também seria necessário um estudo mais aprofundado do tipo de folhagem predominante no dossel presente no SPJ (Beer *et al.*, 2010; Kaiser *et al.*, 2017; Smith e Berry, 2013). Por estes motivos, não foi possível estimar o quanto a vegetação presente no SPJ foi responsável pelo sequestro de CO<sub>2</sub>, porém, não se pode descartar que existe uma influência da vegetação, neste sítio, no sequestro de CO<sub>2</sub>, devido a todos os pontos já destacados anteriormente.

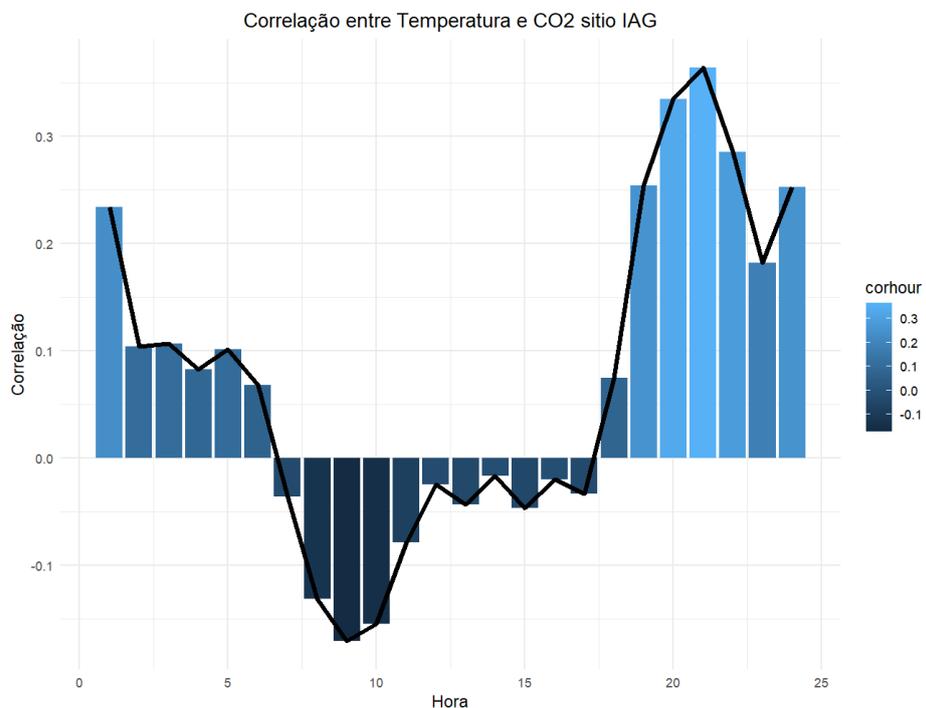


Figura 33 - Correlação horária entre as concentrações de CO<sub>2</sub> (em ppm) medidas no sítio do IAG e a temperatura (em °C). Com um nível de significância  $p < 0,001$

Se para o SPJ, que é o sítio com maior presença de vegetação a temperatura não mostrou boas correlações com o CO<sub>2</sub>, no sítio do IAG as correlações foram ainda menores. Porém, neste sítio estas correlações já eram esperadas, uma vez que o sítio sofre influência muito mais direta das emissões antropogênicas ao longo de todas as horas. Mais uma vez foram geradas as correlações filtradas para o período de verão e do inverno, entretanto, as correlações ficaram maiores para os horários de maior pico do trânsito (consultar anexo IV), logo, mesmo com valores de correlação de até 0,6 para o verão, a temperatura neste sítio também não se mostrou adequada para avaliar as influências de sumidouros de CO<sub>2</sub>.

### 6.2.1.3. Atuação da precipitação como remoção do CO<sub>2</sub>

Ao se observar a Figura 26, notou-se um comportamento anômalo do CO<sub>2</sub> no mês de novembro de 2019, onde se observou uma queda acentuada nas suas concentrações médias.

Na Figura 34 apresenta-se um calendário com as médias da concentração horária do CO<sub>2</sub> para cada dia no ano, sendo possível observar os dias com menores valores e também quando não houve a medida da concentração. Esta mesma figura foi gerada para o SPJ, porém, será disposta na sessão de anexos (Anexo V).

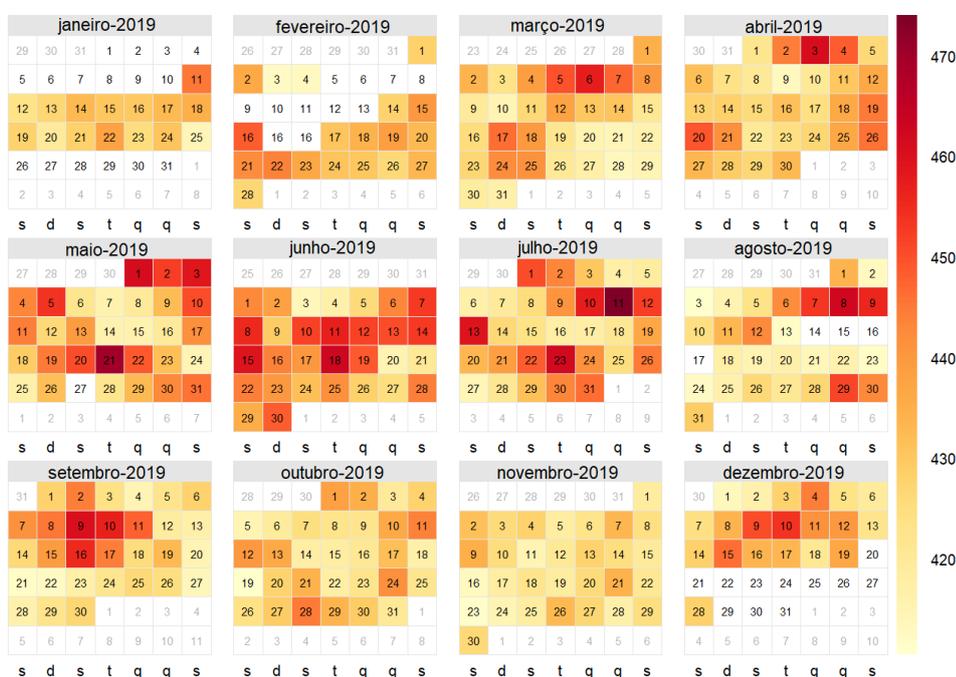


Figura 34 - Concentrações médias horárias de CO<sub>2</sub> (em ppm), por dia do ano em que se realizou a coleta de dados para o sítio do IAG

Observou-se que o mês de novembro foi de fato, o mês que registrou, na maioria dos dias as menores concentrações de CO<sub>2</sub> medidas no sítio do IAG. O que também fez com que a média do mês fosse a mais baixa em relação a todos os outros meses da série, como pode ser observado na tabela 10. Já o SPJ registrou suas menores concentrações durante o mês de julho, como pode ser observado no anexo V e na tabela 10. Logo, como os meses de junho, julho e agosto são os mais secos para a cidade de São Paulo (Oliveira, Bornstein e Soares, 2003; Ribeiro *et al.*, 2018), a hipótese da influência da precipitação na remoção de CO<sub>2</sub> para o SPJ já foi descartada. Por isto, nesta sessão as discussões serão feitas apenas para o sítio do IAG.

Tabela 10 - Concentrações médias mensais do CO<sub>2</sub> (em ppm) e o desvio padrão, para ambos os sítios de coleta.

Estes valores não levaram em consideração os finais de semana.

Meses do ano						
Sítios	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho
IAG	435,17 ± 24,36	432,10 ± 19,33	431,76 ± 22,83	430,21 ± 20,64	435,64 ± 26,95	437,16 ± 26,11
SPJ	415,32 ± 9,45	415,61 ± 9,48	416,26 ± 9,90	416,70 ± 8,35	417,01 ± 8,97	415,02 ± 8,38
Meses do ano						
Sítios	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
IAG	435,71 ± 26,63	429,41 ± 24,51	431,52 ± 21,63	428,37 ± 16,82	423,38 ± 10,40	433,08 ± 21,46
SPJ	414,54 ± 6,44	414,99 ± 6,76	419,94 ± 7,44	420,91 ± 7,52	419,00 ± 7,22	420,22 ± 9,30

Na Figura 35 é apresentada a série temporal das concentrações de CO<sub>2</sub>, em médias diárias, e a série temporal da precipitação com os valores acumulados por dia em mm.

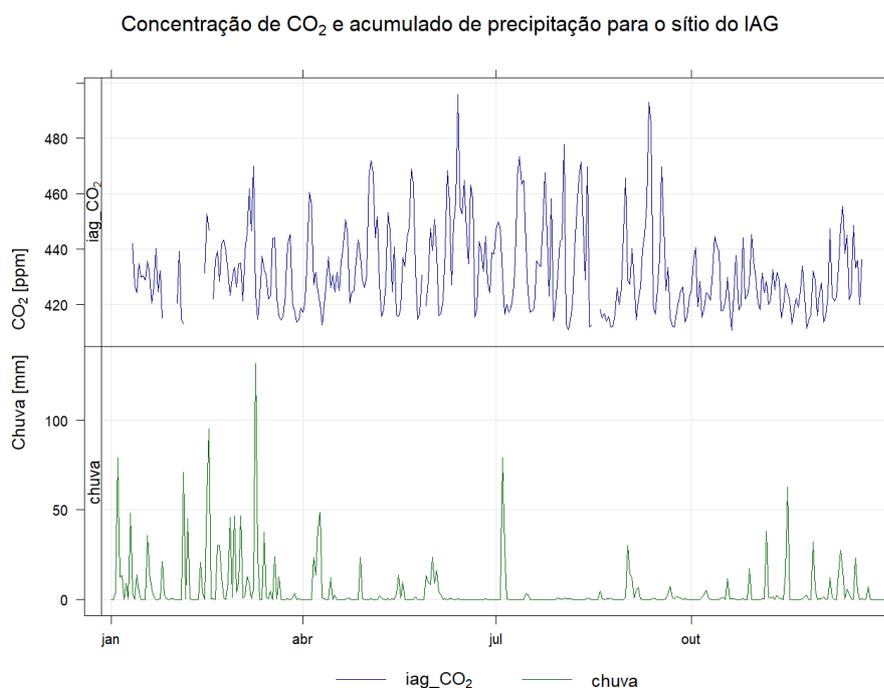
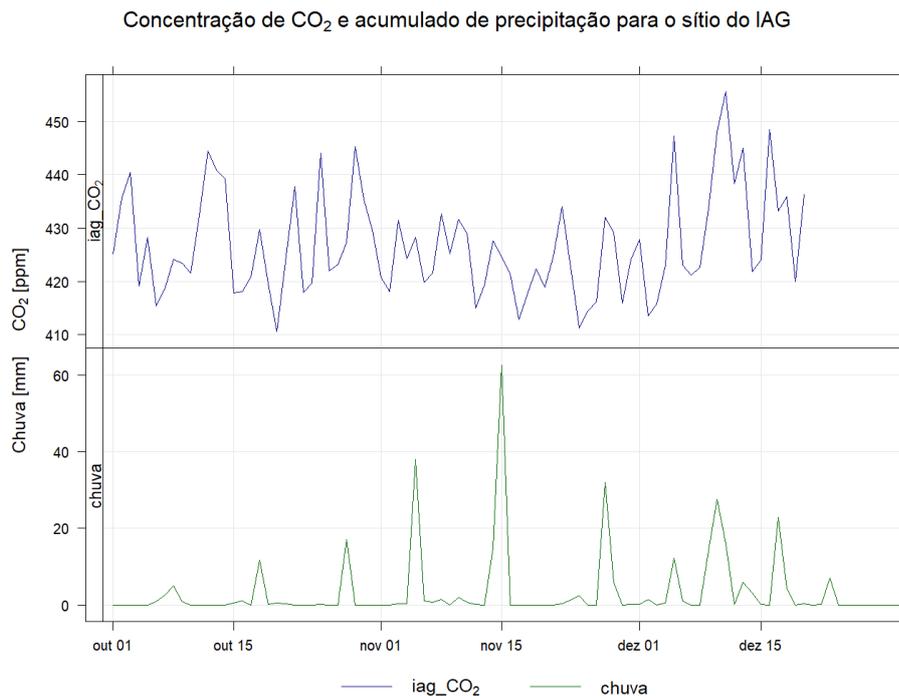


Figura 35 - Série temporal do CO<sub>2</sub> (em ppm) dispostos em médias diárias de concentração e em verde os acumulados diários de precipitação (em mm).

Já nesta figura foi possível identificar que nos mesmos períodos onde ocorriam os maiores acumulados de precipitação, também ocorreram quedas nas concentrações medidas no CO<sub>2</sub>, no entanto, este padrão fica ainda mais evidente quando se observa o período que vai de outubro a dezembro de 2019, apresentado na Figura 36. Deixando ainda mais evidente que as precipitações para o mês de novembro foram superiores aos meses de outubro e de dezembro.



*Figura 36 - Concentrações diárias de CO<sub>2</sub> e os acumulados de precipitação para o sítio do IAG entre os meses de outubro a dezembro.*

Os acumulados de precipitação durante o mês de outubro foram de 40,3 mm e a média das concentrações de CO<sub>2</sub> para o sítio do IAG, foram de  $428,37 \pm 16,82$  ppm. Já durante o mês de novembro, os acumulados mensais de precipitação aumentaram para 163,9 mm, com um pico de 63,7 mm ocorrendo no dia 15 de novembro de 2019, e as concentrações médias de CO<sub>2</sub> foram de  $423,38 \pm 10,40$  ppm para o mesmo mês. Por fim, o mês de dezembro acumulou um total de 116,3 mm com uma concentração média de  $433,08 \pm 21,46$  ppm de CO<sub>2</sub>. A diferença nas concentrações médias foram de, aproximadamente, 5 ppm entre os meses de outubro de novembro, e de ~10 ppm, entre os meses de novembro e dezembro.

No entanto, devido as diferenças registradas nas concentrações mensais e nos aumentos dos índices de precipitação durante o mês de novembro, podemos afirmar que foi a precipitação a responsável pela diminuição nas concentrações de CO<sub>2</sub> neste sítio, no mês em questão.

### 6.3. Concentrações de CO e CO<sub>2</sub>

Depois de toda análise feita para as concentrações do CO<sub>2</sub> no ano de 2019 para ambos os sítios, algumas questões foram levantadas, como quais as principais fontes atuantes em ambos os sítios? E existe um transporte de CO<sub>2</sub> do sítio do IAG em direção ao SPJ? Para tentar responder estas questões analisou-se as relações entre o monóxido de carbono e o CO<sub>2</sub>. Bem como outras correlações que possam embasar as discussões e validar os resultados obtidos.

Para começar as discussões iniciaremos com uma breve análise do perfil do monóxido de carbono que é o principal traçador de emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis (Ciais, Philippe. *et al.*, 2013; Fang *et al.*, 2014; Turnbull *et al.*, 2019; Verhulst *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2010; Xueref-Remy *et al.*, 2018) e cuja maior fonte em São Paulo é a emissão veicular (Nogueira *et al.*, 2021).

### 6.3.1. Monóxido de carbono

A razão entre CO e CO<sub>2</sub> pode indicar uma provável fonte para o CO<sub>2</sub> de origem antrópica. Segundo LOPEZ *et al.*, 2013, para Paris, a relação CO/CO<sub>2f</sub><sup>5</sup> depende da condição de combustão e do tipo de combustível, e pode variar de 17,5 ppb CO ppm<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> para fontes industriais e 14,5 ppb CO ppm<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> para aquecimento residencial e 5,3 ppb CO ppm<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> para o tráfego.

Pérez-Martínez *et al.*, 2014, identificou no seu estudo os fatores de emissão de CO e CO<sub>2</sub> referentes a fontes veiculares. Após uma conversão dos valores publicados pelo autor, chegou-se aos valores dos fatores de emissão nas mesmas unidades de medida mencionados por LOPEZ *et al.*, 2013, sendo 27,5 ppb CO ppm<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> para veículos leves e 2,4 ppb CO ppm<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> para veículos pesados. Ao longo do ano de 2019 foram emitidos cerca de 120 mil t/ano, de monóxido de carbono para a atmosfera. Sendo os veículos leves movidos a gasolina, as principais fontes de emissão de CO na RMSP, representando cerca de 34%, dos 97% relativos a emissão do CO por veículos (CETESB, 2020b).

Por este motivo, foi incorporado a este trabalho uma sessão referente a variabilidade do CO, para uma tentativa de explicar uma parte da fração de CO<sub>2</sub> medida pertencente às emissões antropogênicas. Na Figura 37 são apresentadas as variações horárias medidas pela CETESB, na estação Pinheiros, para o ano de 2019, bem como as variações de CO<sub>2</sub> no sítio do IAG, para o mesmo ano. Observou-se uma maior variabilidade dos dados para os meses relacionados ao inverno no hemisfério sul (inclusive apresentando os valores mais elevados), no entanto, nenhum valor medido de CO ultrapassou o padrão de qualidade do ar adotado pelo estado de São Paulo (CETESB, 2020b).

---

<sup>5</sup> CO/CO<sub>2f</sub> foi uma relação utilizada pelo autor a fim de identificar as porcentagens que poderiam explicar a origem do CO através das emissões de CO<sub>2</sub>. O CO<sub>2f</sub> foi denominado para a parcela total de CO<sub>2</sub> estimada.

Série temporal do CO<sub>2</sub> e do CO para o ano de 2019

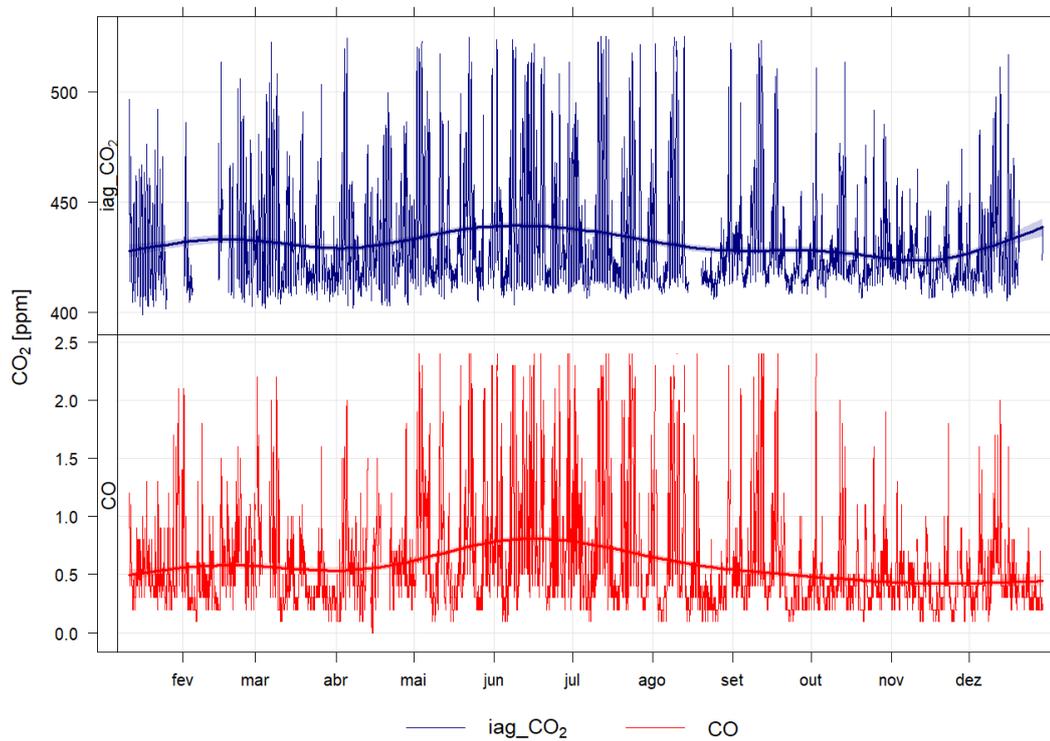


Figura 37 - Variações das concentrações de CO<sub>2</sub> coletadas no sítio do IAG e a concentração de CO (em vermelho) medida na estação Pinheiros pela CETESB, para o ano de 2019. Ambas as concentrações se encontram em ppm

Apenas analisando a Figura 37 notou-se um comportamento do CO muito parecido com o comportamento das concentrações de CO<sub>2</sub> medidas no sítio do IAG. Na Figura 38 são apresentadas as linhas de tendência de ambos os poluentes, onde ficou ainda mais evidente as similaridades nas concentrações.

Linha de tendência do CO<sub>2</sub> e do CO para o sitio do IAG

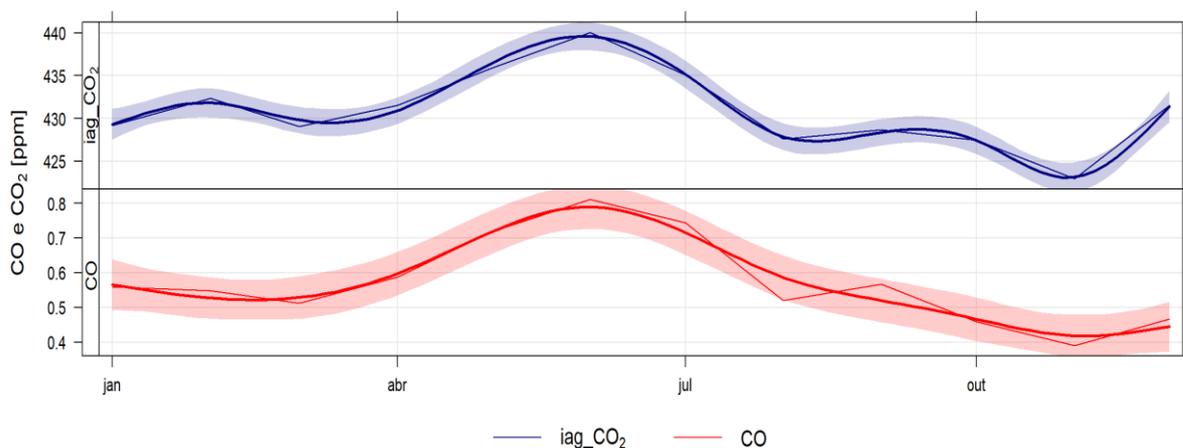


Figura 38 - Linha de tendência das concentrações de CO<sub>2</sub> medidas no IAG e das concentrações de CO medidas na Estação de Qualidade do ar de Pinheiros.

Na Figura 39, constam as variações do CO ao longo dos dias da semana, dos meses e da hora. Esta figura é similar à Figura 26, contida na sessão 6.2, deste trabalho. E novamente as variações observadas na Figura 39, se mostraram extremamente parecidas com as variações do CO<sub>2</sub> medidas no sítio do IAG. Porém, para o SPJ este comportamento não foi observado. Este fato pode estar ligado com dois fatores. O primeiro devido à menor influência de fontes antropogênicas nas concentrações medidas no SPJ. O segundo, e o que se acredita ser o principal motivo, a distância do SPJ da estação de Qualidade do Ar da Rede da CETESB de Pinheiros, onde foram realizadas as medições do CO. Infelizmente, a CETESB não realiza medições de CO na estação SPJ o que inviabilizou as comparações do CO<sub>2</sub> presentes no SPJ com as concentrações de CO, e por este motivo os capítulos a seguir não abordaram as correlações entre o CO e o CO<sub>2</sub> medidos no SPJ.

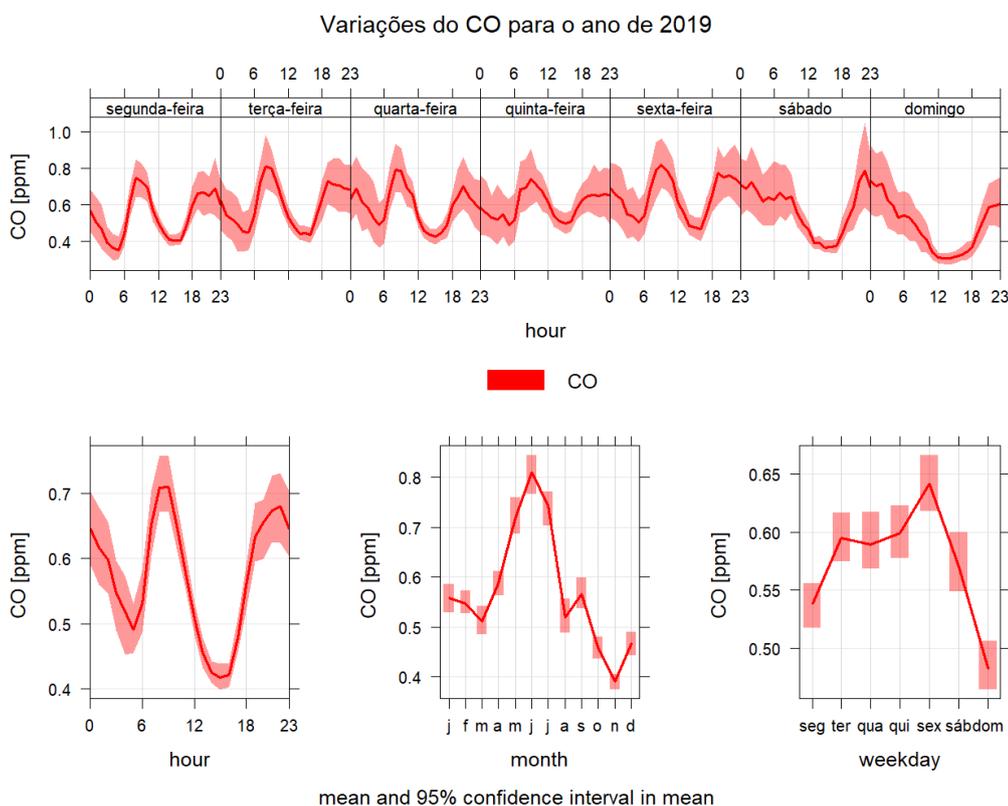
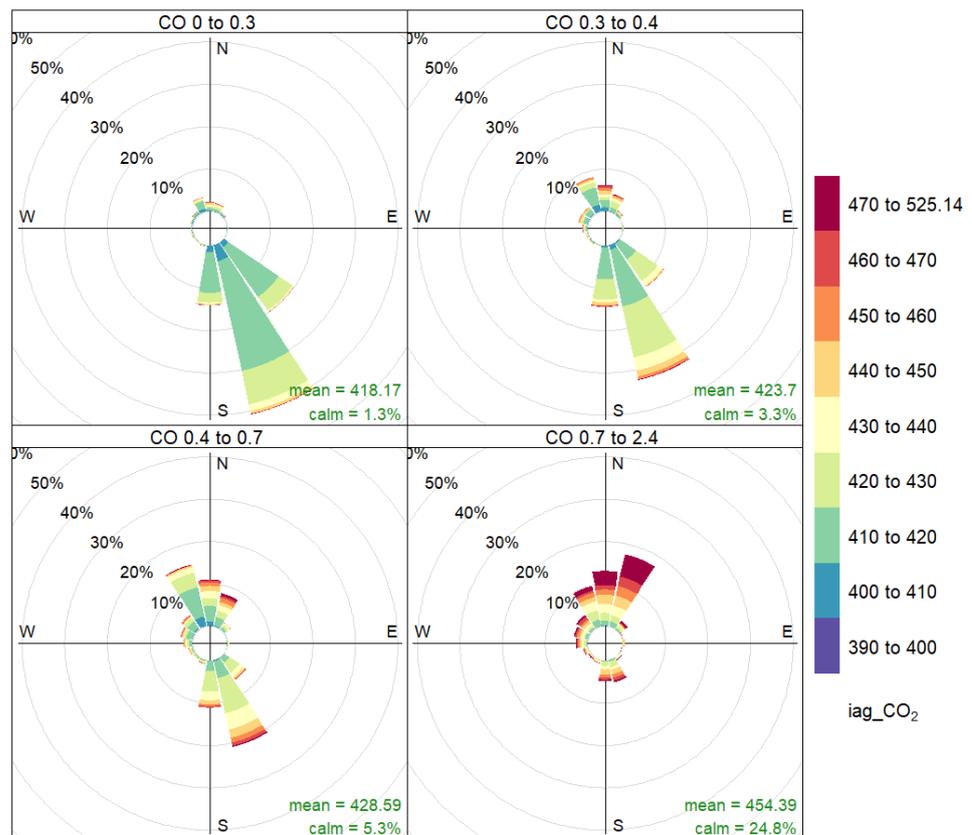


Figura 39 - Variação horária, diária, semanal e mensal do CO (em ppm)

### 6.3.2. Correlação CO e CO<sub>2</sub>

A última sessão dos resultados e discussões foi reservada para comparações das concentrações do CO<sub>2</sub> e do CO, a fim de tentar entender melhor a relação entre eles e identificar uma possível fração que corresponda a parte antropogênica das emissões do CO<sub>2</sub>.

Como observa-se na Figura 40 as maiores concentrações de CO correspondem às maiores concentrações de CO<sub>2</sub>, como podemos identificar analisando os dois últimos quadrados inferiores da figura abaixo: ela mostra que concentrações de CO de 0,7 até 2,4 ppm estão associados com frações maiores das concentrações de 460 até 525 ppm de CO<sub>2</sub>. Além disso, o perfil do vento mostrou que essa relação está presente para quase todas as direções do vento, podendo concluir-se que existe uma influência direta das emissões provenientes do tráfego de veículos.



**Frequency of counts by wind direction (%)**

*Figura 40 - Frequência e direção do vento para cada concentração de CO<sub>2</sub>, perfilados para cada intervalo de concentração de CO em ppm*

A relação de dispersão entre os dois gases, encontra-se na Figura 41, com uma correlação de ~0,9 entre os dois gases com um nível de significância de  $p < 0,001$ . Estas correlações indicam uma forte relação entre o CO e o CO<sub>2</sub> medidos no sítio do IAG, indicando mais uma vez que as emissões destes dois gases podem ser provenientes da mesma fonte, no entanto, esta discussão será abordada a seguir. Na Figura 42, observa-se que as maiores concentrações de CO e CO<sub>2</sub> variam de 0,3 até 0,8 ppm de CO ao longo das horas do dia.

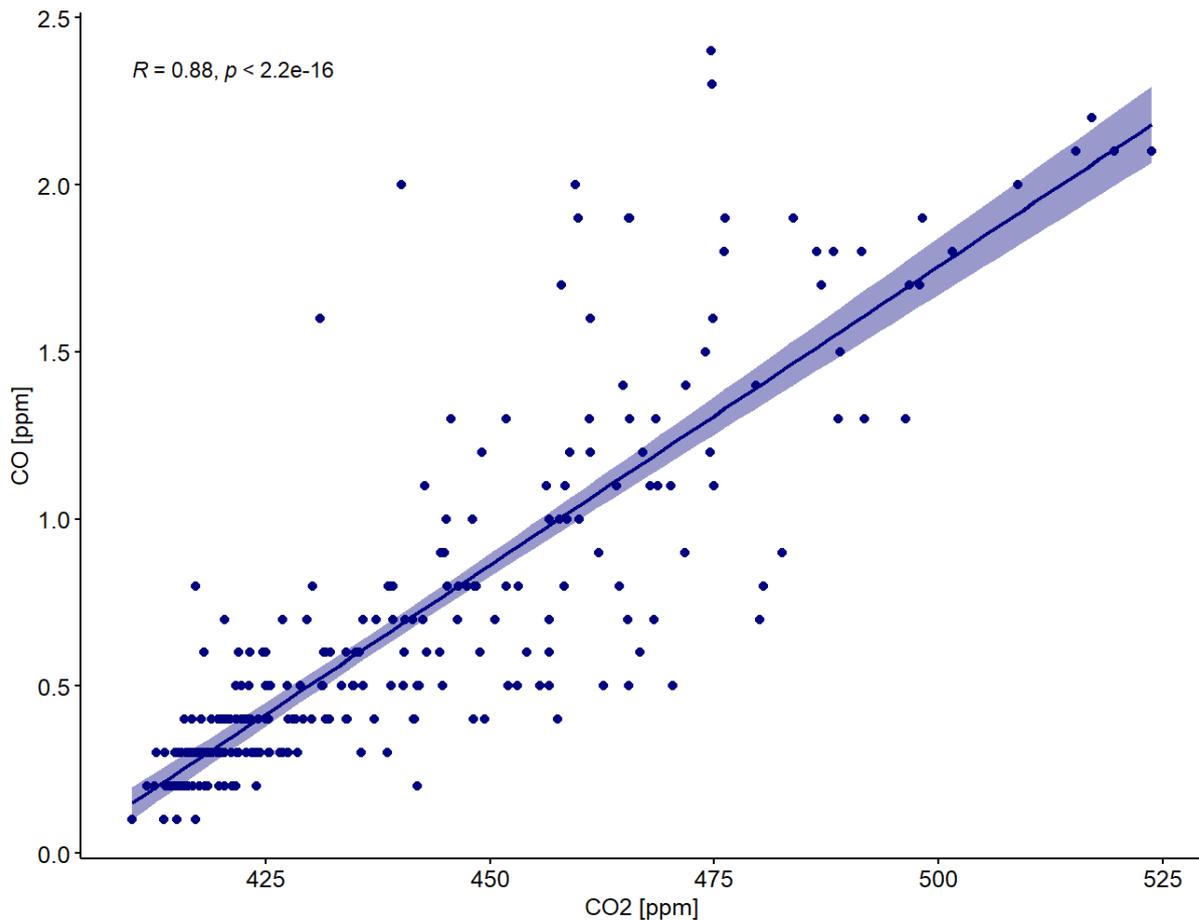


Figura 41 - Gráfico de dispersão de CO versus CO<sub>2</sub>. A linha representa correlação linear entre o CO e o CO<sub>2</sub>. O sombreado indica o nível de significância de 95%.

Na Figura 42 as correlações foram calculadas para cada horário (considerando as médias horárias dos gases), e o que se observou foi uma forte correlação entre estes dois poluentes nas horas de maior pico do trânsito, ou seja, entre as 7 e 9 hrs da manhã e a partir das 20 hrs, quando a correlação entre o CO e o CO<sub>2</sub> chegou a, aproximadamente 0,8 com nível de significância de  $p < 0,001$ . Indicando que apenas 20% do CO<sub>2</sub> medido no sítio do IAG não pôde ser explicado pelo CO durante os horários de maior pico de trânsito. Já para as horas em que as correlações de CO<sub>2</sub> e temperatura foram negativas, ou seja, horas que o sítio do IAG sofre a influência maior de sumidouros de CO<sub>2</sub>, as correlações entre o CO e CO<sub>2</sub> também diminuiram (aproximadamente 0,5 as 15 hrs), indicando que mesmo neste período ainda existiu uma parcela do CO<sub>2</sub> medida no sítio do IAG que pode ser atribuída às emissões veiculares.

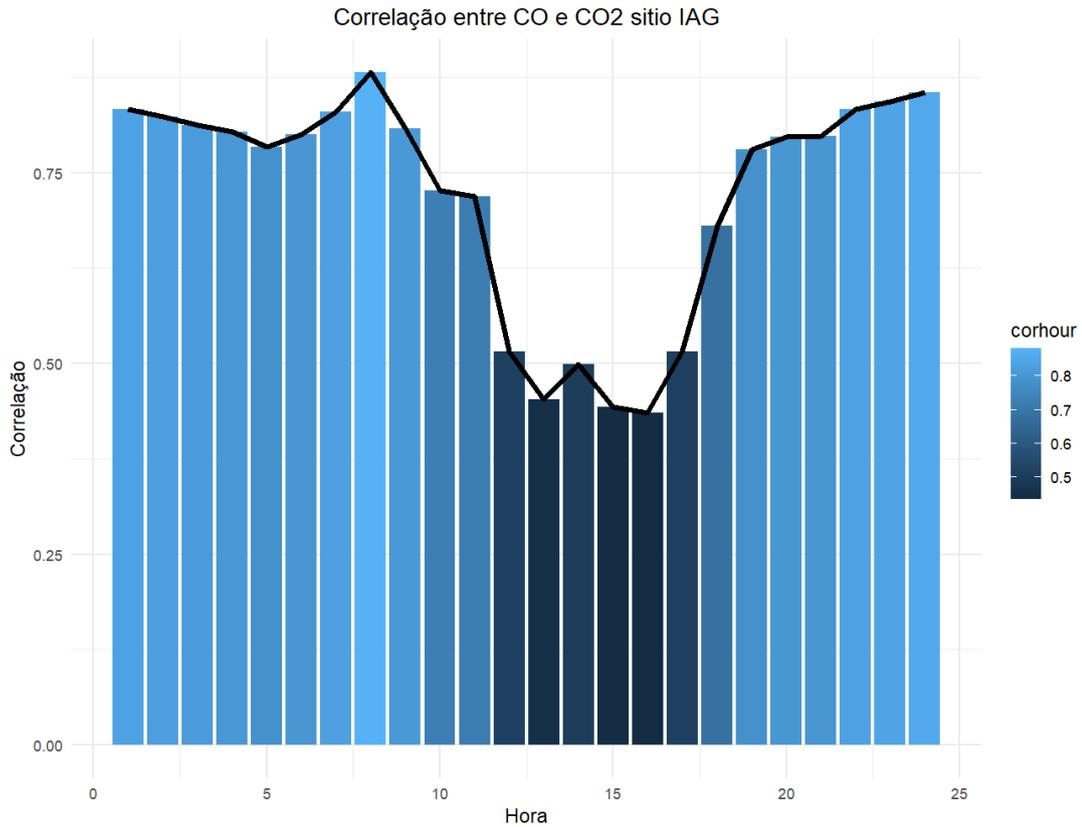


Figura 42 - Correlação horária entre o CO e o CO<sub>2</sub> para o sítio do IAG

Esta mesma comparação entre o CO e CO<sub>2</sub> foi elaborada para o SPJ (Anexo VI), no entanto as correlações entre estes poluentes foram bem inferiores às correlações encontradas no sítio do IAG. Sendo as maiores correlações (~0,3, com o nível de significância de  $p < 0,001$ ) encontradas no período em que as menores correlações entre o CO e o CO<sub>2</sub> foram registradas no sítio do IAG. Corroborando que parte da diminuição das concentrações de CO<sub>2</sub> medidas neste sítio pode ter sido transportada para o SPJ.

Na tentativa de estimar quanto da massa do CO<sub>2</sub> poderia ser explicada pela massa do CO, foi realizada uma análise de correlação linear horária entre o CO<sub>2</sub> e o CO medidos no IAG (Figura 43). Estimou-se que em horários onde o trânsito era mais intenso até 50 ppm de CO<sub>2</sub> poderiam ser explicados pela massa do CO (valor de inclinação da reta de correlação). Para melhorar os resultados, seria necessário desconsiderar a massa de CO<sub>2</sub> de *background* da cidade de São Paulo. Se, hipoteticamente, considerássemos as concentrações de CO<sub>2</sub> medidas no SPJ como medidas de *background* e subtraíssemos estas concentrações da medida no sítio do IAG, seria possível identificar vários dias que ultrapassam 40 ppm de concentração, ou seja, quase 100% da massa do CO<sub>2</sub> poderia ser explicada pelo CO. No entanto, as concentrações do SPJ

também sofreram influências das emissões antropogênicas (como pode ser observado na Figura 44) e por isso esse sítio não poderia ser utilizado como concentração de *background*.

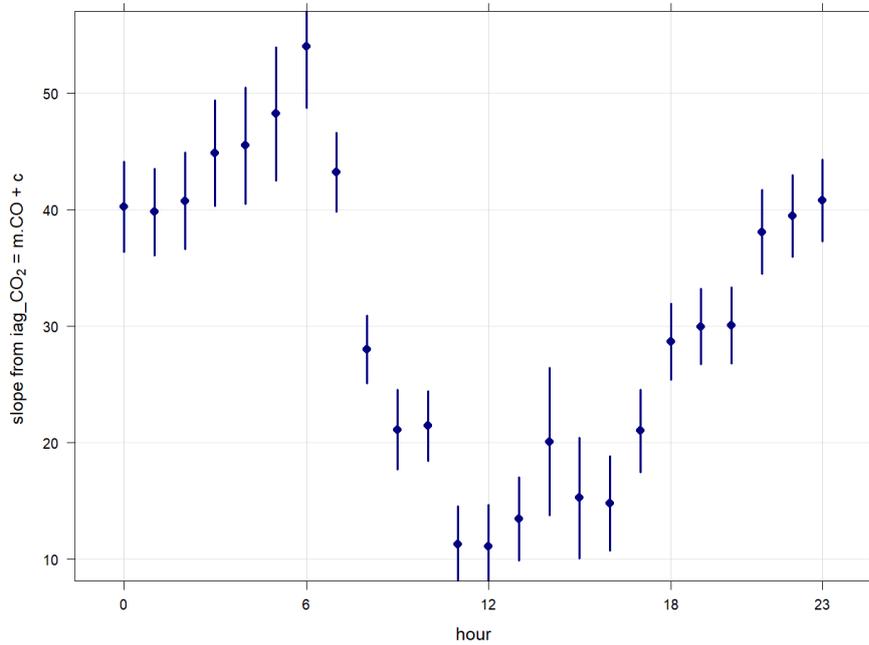


Figura 43 – Valores de inclinações das retas de correlações horárias entre o CO<sub>2</sub> e o CO para o sítio do IAG. Onde no eixo y encontram-se os valores de quanto da massa de CO<sub>2</sub> pode ser explicada pela massa de CO mais a adição de uma constante. No eixo x encontram-se os valores referente a cada hora do dia.

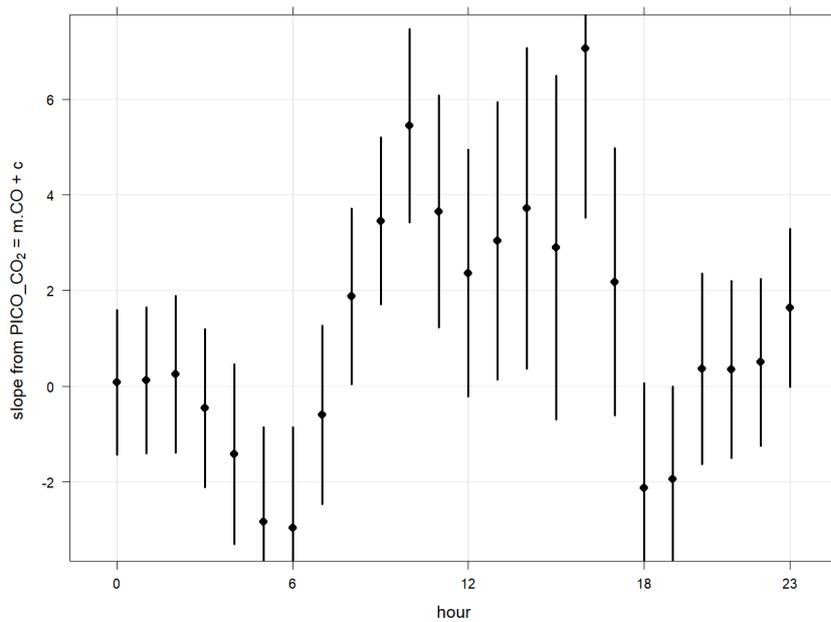


Figura 44 - Inclinações das retas de correlações horárias entre o CO<sub>2</sub> e o CO para o SPJ. Onde no eixo y encontram-se os valores de quanto da massa de CO<sub>2</sub> pode ser explicada pela massa de CO mais a adição de uma constante. No eixo x encontram-se os valores referente a cada hora do dia.

A Figura 44 também ilustra uma das hipóteses levantadas na sessão “*Correlações entre concentrações de CO<sub>2</sub> e Temperatura*”. Na qual foi levantada questão de que a temperatura também não teria uma correlação boa com o CO<sub>2</sub> devido a influências de fontes antropogênicas. O que pode ser visto analisando a Figura 44, é que onde se esperava as maiores correlações negativas com a temperatura, nota-se a presença das maiores explicações da massa de CO<sub>2</sub> pelo CO presentes no SPJ. Indicando que as concentrações de CO<sub>2</sub> medidas no SPJ realmente sofrem influências de emissões antropogênicas no período da tarde, o que seria a justificativa para as correlações baixas entre o CO<sub>2</sub> e a temperatura, se não fossem os problemas com os dados de temperatura discutidos na sessão anterior.

Por fim, para comparar os resultados obtidos para ano de 2019 com as razões entre o CO e o CO<sub>2</sub> publicados por Pérez-Martínez *et al.*, 2014, foi gerado a **Figura 45**, que consiste na razão de CO por CO<sub>2</sub>, ajustados para que unidade de medida fossem as mesmas divulgadas por este e outros autores, como Lopez *et al.*, 2013.

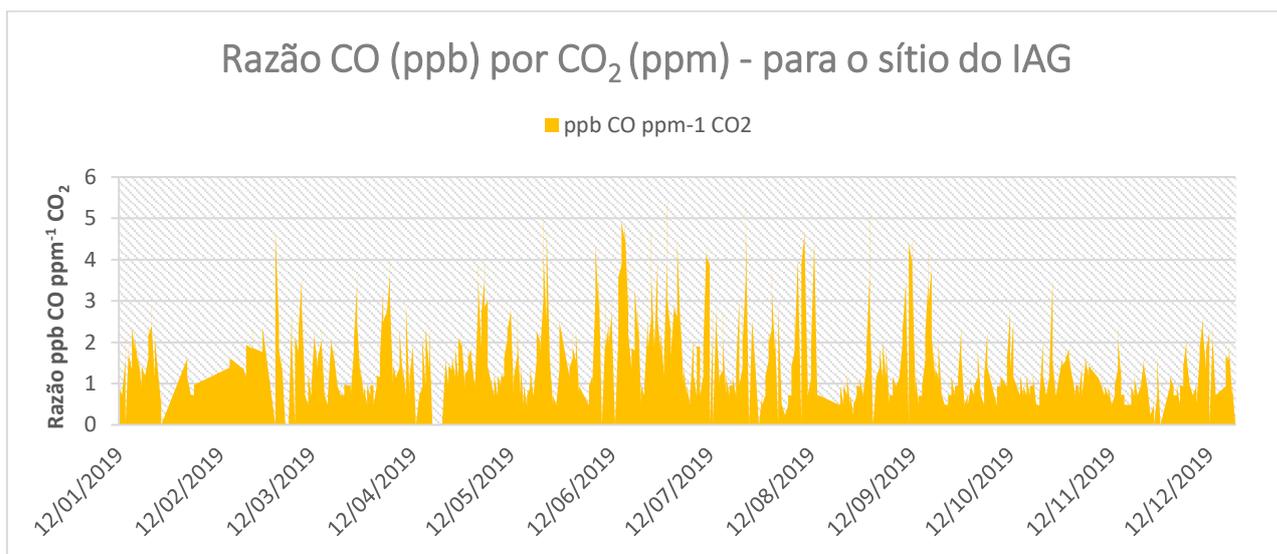


Figura 45 - Razão do CO (em ppb) pelo CO<sub>2</sub> (em ppm), para o sítio do IAG

Notou-se na Figura 45 que os maiores valores de razão CO/CO<sub>2</sub> foram de aproximadamente 4,2 ppb CO ppm<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> durante os meses de outono e inverno. Quando comparamos esse valor com os fatores de emissões de veículos leves e pesados identificados por Pérez-Martínez *et al.*, 2014 (27,5 ppb CO ppm<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> para veículos leves e 2,4 ppb CO ppm<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> para veículos pesados), percebemos que nossas taxas foram mais elevadas do que os fatores de emissão de CO/CO<sub>2</sub> de veículos pesados e muito mais baixa do que os fatores de emissão para veículos leves. Embora, as vias que circundam as intermediações do sítio do IAG registrem a passagem de veículos pesados, a maioria dos veículos que trafegam por estas vias

são da categoria leves. Logo, as diferenças entre as razões de CO/CO<sub>2</sub> registradas em 2019 podem estar associadas as reduções de emissões de CO registradas pela CETESB, 2020, que registrou uma queda de quase 0,5 ppm de CO entre as médias anuais de 2011/2013 (1,5 ppm de CO em médias de 8 horas), do ano em que foi elaborado o estudo de Pérez-Martínez *et al.*, 2014, para a as médias anuais de 2017/2019 (1 ppm de CO em médias de 8 horas). Destaca-se que a metodologia aplicada por Pérez-Martínez *et al.*, 2014, para a realização da razão CO/CO<sub>2</sub> envolveu a coleta das concentrações dos poluentes em túneis presentes na cidade de São Paulo, logo, as concentrações presentes na atmosfera tendem a apresentar comportamentos diferentes e por consequência também impactam em razões entre o CO e o CO<sub>2</sub> distintas das encontradas na bibliografia.

Outro destaque que pode ter impactado nas diferenças entre o CO e CO<sub>2</sub> encontradas nesta pesquisa, quando comparadas com as estimativas de emissões calculadas por Pérez-Martínez *et al.*, 2014, está no fato de haver um aumento do consumo de combustíveis entre os anos de 2013 e 2019, dentro do estado de São Paulo, como pode ser observada na Figura 46.

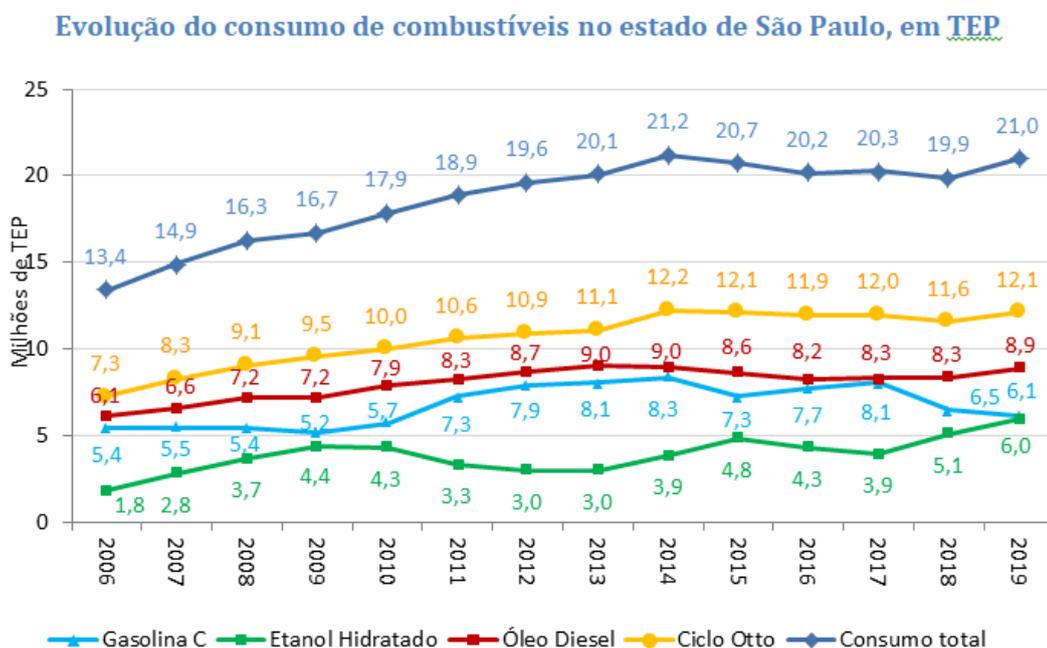


Figura 46 - Evolução do Consumo de combustíveis no estado de São Paulo, em Toneladas equivalente de petróleo (TEP), desde o ano de 2006 até o ano de 2019. (Fonte: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/combustiveis/>, data de acesso: 01/03/2022)

### 6.3.3. Estudo sobre o transporte de CO<sub>2</sub>

Nos tópicos onde foram abordadas as correlações de CO<sub>2</sub> e as variáveis meteorológicas levantou-se uma hipótese de que parte das concentrações de CO<sub>2</sub> medidas no sítio do IAG

poderiam estar sendo transportadas para longas distâncias, chegando até a influenciar as concentrações de CO<sub>2</sub> medidas no SPJ. Em uma tentativa de se identificar estas influências foram estudadas as correlações entre as variáveis meteorológicas e as concentrações de CO<sub>2</sub> e CO, para ambos os sítios. Os índices de correlação foram dispostos na tabela 11, para facilitar as comparações entre os valores obtidos.

*Tabela 11 - Valores de Correlações entre os poluentes e as variáveis meteorológicas medidas em ambos os sítios. Onde a velocidade do vento se encontra em m s<sup>-1</sup>, a temperatura em °C e o CO e CO<sub>2</sub> em ppm. Todas as correlações apresentaram níveis de significância p < 0,05.*

		IAG				SPJ			
		CO <sub>2</sub>	Temp	Vel. Vento	CO	CO <sub>2</sub>	Temp	Vel. Vento	CO
<b>Verão</b>	<b>todas as horas</b>	0,75	-0,24	-0,66	0,47	0,75	-0,44	-0,17	0,2
	<b>Dia</b>	0,78	-0,33	-0,47	0,49	0,78	-0,51	0	0,21
	<b>Noite</b>	0,73	-0,12	-0,66	0,55	0,73	-0,3	-0,17	0,32
	<b>Hora maior pico</b>	0,73	-0,12	-0,66	0,55	0,73	-0,3	-0,17	0,32
<b>Inverno</b>	<b>todas as horas</b>	0,38	-0,16	-0,79	0,77	0,38	-0,38	-0,06	0,07
	<b>Dia</b>	0,56	-0,25	-0,7	0,72	0,56	-0,46	0	0,18
	<b>Noite</b>	0	0,26	-0,83	0,89	0	-0,06	-0,12	0
	<b>Hora maior pico</b>	0,1	-0,1	-0,79	0,82	0,1	-0,36	0	-0,09
<b>Sem Finais de Semana</b>	<b>todas as horas</b>	0,51	-0,17	-0,72	0,56	0,51	-0,25	-0,12	0
	<b>Dia</b>	0,65	-0,33	-0,61	0,52	0,65	-0,34	-0,07	0,08
	<b>Noite</b>	0,15	0,27	-0,77	0,76	0,15	0,18	-0,2	0,06
	<b>Hora maior pico</b>	0,35	-0,14	-0,73	0,61	0,35	-0,18	-0,08	0

Ao se analisar as correlações obtidas foi possível identificar que no período referente ao verão as correlações do CO<sub>2</sub> entre os sítios de coleta foram as maiores do que em todos os outros períodos, somando-se a este fato que as correlações de CO no SPJ também foram as mais elevadas. Estes dois fatores somados ao fato de que durante o verão o SPJ apresentou a maior variabilidade em sua média de concentração ( $417,59 \pm 10,08$ ), permitiu concluir de que há fortes indícios de transportes das concentrações de CO<sub>2</sub> do sítio do IAG para o SPJ. E se considerarmos que durante o ano de 2019 as correlações de CO<sub>2</sub> em ambos os sítios, sem levar em consideração os finais de semana foram maiores durante o período diurno, também nos permite dizer que este transporte entre os dois sítios ocorreu durante as horas do dia. Corroboram com estas conclusões o fato de que nos meses do inverno onde as velocidades do vento foram as menores em ambos os sítios, as correlações de CO<sub>2</sub> entre os sítios foram as menores registradas em todo o período, logo, para estes meses a ocorrência de transporte é quase nula, uma vez que o SPJ registrou nestes meses as menores correlações com o CO.

## 7. CONCLUSÕES

Em face de todas as análises e discussões dispostas nesta dissertação, foi possível concluir que:

- As concentrações de CO<sub>2</sub> medidas durante o ano de 2019, apresentaram um aumento em relação a toda a série temporal de medições (iniciada em 2014). Registrando um aumento de aproximadamente 13,6 ppm, ou seja, quase 3,3% de aumento desde o ano de 2014 até 2019, o que é consistente com o aumento do consumo de combustível no período, principal fonte de emissão de CO<sub>2</sub> em São Paulo.
- As concentrações de CO<sub>2</sub> apresentaram fortes variabilidades ao longo das estações do ano em ambos os sítios. Sendo o inverno a estação que contribuiu para os maiores valores médios de concentrações de CO<sub>2</sub> para o sítio do IAG ( $436,43 \pm 27,1$  ppm), seguida pela estação do verão ( $432,53 \pm 21,7$  ppm), outono ( $430,8 \pm 22,9$  ppm) e primavera ( $428,64 \pm 18,29$  ppm). Já para o SPJ foi a primavera que registrou a maior média das concentrações de CO<sub>2</sub> ( $420,15 \pm 7,44$  ppm), seguida pelas estações do verão ( $417,59 \pm 10,1$  ppm), outono ( $416,73 \pm 9,0$  ppm) e inverno ( $414,24 \pm 6,81$  ppm).
- Existem fortes indícios das concentrações CO<sub>2</sub> medidas no sítio do IAG estarem sendo transportadas para o SPJ, durante os meses da primavera e verão. Meses estes que registraram as menores variabilidades nas concentrações médias em ambos os sítios (para os meses da primavera) e as maiores correlações de CO<sub>2</sub> (para os meses de Verão) entre os sítios. Outro forte indício deste transporte está no aumento da massa de CO<sub>2</sub> explicada pela massa do CO, no SPJ nos meses de verão (conferir no anexo VII)
- As velocidades do vento se mostraram um importante controlador nas concentrações de CO<sub>2</sub> onde, as menores velocidades do vento foram relacionadas com as maiores concentrações de CO<sub>2</sub>, sendo que o oposto também se mostrou verdadeiro.
- A precipitação foi um dos fatores que influenciou na redução das concentrações de CO<sub>2</sub> medidas no sítio do IAG.
- Embora neste estudo não tenha sido possível identificar a influência de sumidouros biogênicos nas concentrações de CO<sub>2</sub> medidas em ambos os sítios, a variabilidade diária das concentrações, mostraram indícios dessa influência, uma vez que os mínimos de concentrações, em ambos os sítios, foram registrados no período de maior temperatura, independentemente da velocidade do vento.

- As correlações altas entre o CO<sub>2</sub> e o CO medidos no sítio do IAG, permitiram concluir que mais de 88% das concentrações de CO<sub>2</sub> foram provenientes de emissões veiculares no sítio do IAG (Figura 41).

- Desta forma este trabalho apresenta a variabilidade das concentrações de CO<sub>2</sub> em dois sítios com características diferentes, sendo um mais impactado por fontes antrópicas. As diferenças entre os dois sítios foram significativas mostrando que as estimativas de emissão calculadas para a cidade podem estar com grandes incertezas. As medidas em diferentes pontos da cidade serão utilizadas para a verificação de inventários de emissão. Desta forma, este trabalho, apresenta uma importante contribuição apresentando valores médios de CO<sub>2</sub> encontrado em São Paulo.

## 8. TRABALHOS FUTUROS

Alguns pontos discutidos neste trabalho ainda precisam ser melhor avaliados e por isto, as etapas futuras desta pesquisa, será:

- Estudar o desenvolvimento da CLP na cidade de São Paulo, para auxiliar na quantificação de CO<sub>2</sub> transportado entre o sítio do IAG e o SPJ.
- Estudar alternativas de quantificação de CO<sub>2</sub> de *background* para a cidade de São Paulo, a fim de melhorar os resultados referentes ao quanto de massa de CO<sub>2</sub> medidas no IAG pode ser explicada pelo CO.
- Estudar melhor os impactos das oscilações de baixa frequência da meteorologia, como por exemplo eventos de EL Niño/ La Niña nas mudanças das concentrações de CO<sub>2</sub> dentro da cidade, uma vez que estas oscilações impactam diretamente na temperatura, precipitação e no regime dos ventos atuantes na cidade de São Paulo.
- Iniciar as medidas de irradiância no SPJ para auxiliar na identificação do sequestro de CO<sub>2</sub> por fontes biogênicas atuantes no sítio. Bem como estudar as concentrações de CH<sub>4</sub> para estimar as emissões de CO<sub>2</sub> que também atuam neste sítio.

## 9. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- Albuquerque Sant'Anna, A., & Costa, L. (2021). Environmental regulation and bail outs under weak state capacity: Deforestation in the Brazilian Amazon1. *Ecological Economics*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107071>
- Andrade, M. de F., Kumar, P., de Freitas, E. D., Ynoue, R. Y., Martins, J., Martins, L. D., Nogueira, T., Perez-Martinez, P., de Miranda, R. M., Albuquerque, T., Gonçalves, F. L. T., Oyama, B., & Zhang, Y. (2017). Air quality in the megacity of São Paulo: Evolution over the last 30 years and future perspectives. *Atmospheric Environment*, 159, 66–82. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.051>
- Apadula, F. ., Gotti, A. ., Pigini, A. ., Longhetto, A. ., Rocchetti, F. ., Cassardo, C. ., Ferrarese, S. ., & Forza, R. (2003). Localization of source and sink regions of carbon dioxide through the method of the synoptic air trajectory statistics. *Atmospheric Environment*, 37(27), 3757–3770. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00505-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00505-3)
- Azevedo, T. R. de, Costa, C., Brandão, A., Dos Santos Cremer, M., Piatto, M., Tsai, D. S., Barreto, P., Martins, H., Sales, M., Galuchi, T., Rodrigues, A., Morgado, R., Ferreira, A. L., Barcellos E Silva, F., De Freitas Viscondi, G., Dos Santos, K. C., Da Cunha, K. B., Manetti, A., Coluna, I. M. E., ... Kishinami, R. (2018). SEEG initiative estimates of Brazilian greenhouse gas emissions from 1970 to 2015. *Scientific Data*, 5. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.45>
- Beer, C., Reichstein, M., Tomelleri, E., Ciais, P., Jung, M., Carvalhais, N., Rödenbeck, C., Arain, M. A., Baldocchi, D., Bonan, G. B., Bondeau, A., Cescatti, A., Lasslop, G., Lindroth, A., Lomas, M., Luysaert, S., Margolis, H., Oleson, K. W., Rouspard, O., ... Papale, D. (2010). Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate. *Science*, 329(5993), 834–838. <https://doi.org/10.1126/science.1184984>
- Brannon, E. Q., Moseman-Valtierra, S. M., Rella, C. W., Martin, R. M., Chen, X., & Tang, J. (2016). Evaluation of laser-based spectrometers for greenhouse gas flux measurements in coastal marshes. *Limnology and Oceanography: Methods*, 14(7), 466–476. <https://doi.org/10.1002/LOM3.10105>
- LEI Nº 12.114, DE 9 DE DEZEMBRO DE 2009, (2009) (testimony of Brasil). [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2009/lei/12114.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/12114.htm)
- Brasil, M. da C. T. e I.-M. (2021). Resultados do Inventário Nacional de Emissões de Gases de Efeito Estufa por Unidade Federativa. In *Governo Federal*. <https://www.gov.br/mcti/pt->

- br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/emissoes-por-unidade-federativa
- Brasil, M. do M. A. (2018). *RESOLUÇÃO Nº 491, DE 19 DE NOVEMBRO DE 2018 - Imprensa Nacional*. [https://www.in.gov.br/web/guest/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895/do1-2018-11-21-resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603](https://www.in.gov.br/web/guest/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895/do1-2018-11-21-resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603)
- Breón, F. M., Broquet, G., Puygrenier, V., Chevallier, F., Xueref-Remy, I., Ramonet, M., Dieudonné, E., Lopez, M., Schmidt, M., Perrussel, O., & Ciais, P. (2015). An attempt at estimating Paris area CO<sub>2</sub> emissions from atmospheric concentration measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(4), 1707–1724. <https://doi.org/10.5194/acp-15-1707-2015>
- Brilhante, O. M., & Caldas, L. (1999). Gestão e avaliação da poluição, impacto e risco na saúde ambiental. *SciELO Books*, 155. <http://books.scielo.org/id/ffk9n>
- Canadell, J. G., Monteiro, P. M. S., Costa, M. H., Cunha, L. C. da, Cox, P. M., Eliseev, A. V., Henson, S., Ishii, M., Jaccard, S., Koven, C., Lohila, A., Patra, P. K., Piao, S., Rogelj, J., Syampungani, S., Zaehle, S., & Zickfeld, K. (2021). Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In V. Brovkin & R. A. Feely (Eds.), *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis* (pp. 151–156). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport>
- CETESB. (2011). Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo. In *GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO - SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO* (Vol. 2, Issue 1, p. 192). Governo de São Paulo. [https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2014/01/Primeiro\\_Inventario\\_GEE\\_WEB\\_Segunda-Edicao-v1.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2014/01/Primeiro_Inventario_GEE_WEB_Segunda-Edicao-v1.pdf)
- CETESB. (2017a). *Plano de Controle de Poluição Veicular 2017 – PCPV* (p. 61). Governo de São Paulo. <http://veicular.cetesb.sp.gov.br/relatorios-e-publicacoes/>
- CETESB. (2017b). *Qualidade do ar no estado de São Paulo*. <https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2018/05/relatorio-qualidade-ar-2017.pdf>
- CETESB. (2020a). *Emissões veiculares no estado de São Paulo 2019*. 137. <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>
- CETESB. (2020b). *Qualidade do ar no estado de São Paulo*. <https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2020/07/Relatório-de-Qualidade-do-Ar-2019.pdf>
- Ciais, P., Dolman, A. J., Bombelli, A., Duren, R., Peregon, A., Rayner, P. J., Miller, C., Gobron,

- N., Kinderman, G., Marland, G., Gruber, N., Chevallier, F., Andres, R. J., Balsamo, G., Bopp, L., Bréon, F. M., Broquet, G., Dargaville, R., Battin, T. J., ... Zehner, C. (2014). Current systematic carbon-cycle observations and the need for implementing a policy-relevant carbon observing system. *Biogeosciences*, *11*(13), 3547–3602. <https://doi.org/10.5194/bg-11-3547-2014>
- Ciais, Philippe., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quéré, C., Myneny, R. B., Piao, S., & Thornton, P. (2013). Carbon and Other Biogeochemical Cycles Chapter 6. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Second Ord, pp. 465–570). IPCC WGI Fifth Assessment Report. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.014>
- Ciais, Philippe, Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Quéré, C. Le, Myneni, R. B., Piao, S., & Thornton, P. (2013a). The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Change, IPCC Climate*, 465–570. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.015>
- Ciais, Philippe, Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Quéré, C. Le, Myneni, R., Piao, S., & Thornton, P. (2013b). Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. In C. Heinze, P. Tans, & T. Vesala (Eds.), *Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 465–570). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.015>
- Croux, C., & Dehon, C. (2010). Influence functions of the Spearman and Kendall correlation measures. *Statistical Methods and Applications*, *19*(4), 497–515. <https://doi.org/10.1007/s10260-010-0142-z>
- Duren, R. M., & Miller, C. E. (2012). Measuring the carbon emissions of megacities. *Nature Climate Change*, *2*(8), 560–562. <https://doi.org/10.1038/nclimate1629>
- EKOS, I., & Geoklock, C. e E. A. (2013). Inventário de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa do Município de São Paulo de 2003 a 2009 com atualização para 2010 e 2011 nos setores Energia e Resíduos. In *Instituto Ekos Brasil, Geoklock Consultoria e Engenharia Ambiental*. (Vol. 12). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- EMPA. (2013). *WCC-Empa Report 12/3 SYSTEM AND PERFORMANCE AUDIT OF*

- SURFACE OZONE, METHANE, CARBON DIOXIDE, NITROUS OXIDE AND CARBON MONOXIDE AT THE GLOBAL GAW STATION* (M. T. Cimone, C. Zellweger, M. Steinbacher, B. Buchmann, & R. Steinbrecher (eds.)). [https://www.empa.ch/documents/56101/250799/Mt\\_Cimone12.pdf/b4429f55-6744-427f-b47c-5a907fcb1a41](https://www.empa.ch/documents/56101/250799/Mt_Cimone12.pdf/b4429f55-6744-427f-b47c-5a907fcb1a41)
- European Environment Agency. (2016). European Union emission inventory report 1990–2014 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP). In *EEA Technical report* (Issue 16).
- Fang, S. X., Zhou, L. X., Tans, P. P., Ciais, P., Steinbacher, M., Xu, L., & Luan, T. (2014). In situ measurement of atmospheric CO<sub>2</sub> at the four WMO/GAW stations in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *14*(5), 2541–2554. <https://doi.org/10.5194/acp-14-2541-2014>
- Garreaud, R. D., & Wallace, J. M. (1998). Summertime incursions of midlatitude air into subtropical and tropical South America. *Monthly Weather Review*, *126*(10), 2713–2733. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<2713:SIOMAI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<2713:SIOMAI>2.0.CO;2)
- Gately, C. K., & Hutyra, L. R. (2017). Large Uncertainties in Urban-Scale Carbon Emissions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *122*(20), 11,242–11,260. <https://doi.org/10.1002/2017JD027359>
- Global Covenant of Mayors for Climate & Energy. (2018). *Raising Global Climate Ambition: Aggregate Impact of the Global Covenant of Mayors for climate & energy* (p. 4). Global Covenant of Mayors for Climate & Energy. [https://www.globalcovenantofmayors.org/wp-content/uploads/2017/11/GCoM\\_COP23Aggregation\\_Brochure-FINAL.pdf](https://www.globalcovenantofmayors.org/wp-content/uploads/2017/11/GCoM_COP23Aggregation_Brochure-FINAL.pdf)
- Gurney, Kevin R., Mendoza, D. L., Zhou, Y., Fischer, M. L., Miller, C. C., Geethakumar, S., & de la Rue du Can, S. (2009). High Resolution Fossil Fuel Combustion CO<sub>2</sub> Emission Fluxes for the United States. *Environmental Science & Technology*, *43*(14), 5535–5541. <https://doi.org/10.1021/es900806c>
- Gurney, Kevin Robert, Romero-Lankao, P., Seto, K. C., Hutyra, L. R., Duren, R., Kennedy, C., Grimm, N. B., Ehleringer, J. R., Marcotullio, P., Hughes, S., Pincetl, S., Chester, M. V., Runfola, D. M., Feddema, J. J., & Sperling, J. (2015). Climate change: Track urban emissions on a human scale. *Nature Climate Change*, *5*(2), 179–181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/525179a>
- Ibarra-Espinosa, S., Ynoue, R., O&apos;sullivan, S., Pebesma, E., Andrade, M. de F., & Osses, M. (2018). VEIN v0.2.2: an R package for bottom–up vehicular emissions inventories. *Geoscientific Model Development*, *11*(6), 2209–2229.

- <https://doi.org/10.5194/gmd-11-2209-2018>
- IBGE. (2017). *Panorama da Cidade de São Paulo*. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama>
- IPCC. (1996). *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Houghton, J.T; Meira Filho, L.G; Lim, B.; Tréanton, K.; Mamaty, I; Bonduki, Y.; Griggs, D.J.; Callander, B.A (eds.). <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs4.html>
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, & J. C. Minx (eds.)). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415416.005>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In R. P. Allan, P. A. Arias, S. Berger, J. G. Canadell, C. Cassou, D. Chen, A. Cherchi, S. L. Connors, E. Coppola, F. A. Cruz, A. Diongue-Niang, F. J. Doblas-Reyes, H. Douville, F. Driouech, T. L. Edwards, F. Engelbrecht, V. Eyring, E. Fischer, G. M. Flato, ... K. Zickfeld (Eds.), *14th Session of Working Group I and 54th Session of the IPCC* (Vol. 34, Issue 2). <https://doi.org/10.3724/sp.j.7103161536>
- IPEA. (2018). ODS-Metas Nacionais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável AGENDA 2030. In <http://www.ipea.gov.br>. <http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/8855>
- Kaiser, E., Zhou, D., Heuvelink, E., Harbinson, J., Morales, A., & Marcelis, L. F. M. (2017). Elevated CO<sub>2</sub> increases photosynthesis in fluctuating irradiance regardless of photosynthetic induction state. *Journal of Experimental Botany*, 68(20), 5629–5640. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERX357>
- Kamigauti, L. Y., Fontenelle, A. L., Coutinho, F., Ávila, A. M. H. de, & Peyerl, D. (2022). The main challenges of the Brazilian energy governance for the mitigation and adaptation to climate change. In *Brazilian Energy Transition*.
- Keeling, C. D., Piper, S. C., Bacastow, R. B., Wahlen, M., Whorf, T. P., Heimann, M., & Meijer, H. A. (2001). *Exchanges of Atmospheric CO<sub>2</sub> and <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> with the Terrestrial Biosphere and Oceans from 1978 to 2000. I. Global Aspects*. [https://scrippsco2.ucsd.edu/assets/publications/keeling\\_sio\\_ref\\_series\\_exchanges\\_of\\_co2\\_ref\\_no\\_01-06\\_2001.pdf](https://scrippsco2.ucsd.edu/assets/publications/keeling_sio_ref_series_exchanges_of_co2_ref_no_01-06_2001.pdf)

- Kubba, S. (2017). Indoor environmental quality. In *Handbook of Green Building Design and Construction (Second Edition)* (pp. 353–412). Joe Hayton. <https://doi.org/10.1201/b14052>
- Lopez, M., Schmidt, M., Delmotte, M., Colomb, A., Gros, V., Janssen, C., Lehman, S. J., Mondelain, D., Perrussel, O., Ramonet, M., Xueref-Remy, I., & Bousquet, P. (2013). CO, NO<sub>x</sub> and <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> as tracers for fossil fuel CO<sub>2</sub>: Results from a pilot study in Paris during winter 2010. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *13*(15), 7343–7358. <https://doi.org/10.5194/acp-13-7343-2013>
- McKain, K., Wofsy, S. C., Nehr Korn, T., Eluszkiewicz, J., Ehleringer, J. R., & Stephens, B. B. (2012). Assessment of ground-based atmospheric observations for verification of greenhouse gas emissions from an urban region. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(22), 8423–8428. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116645109>
- MCTIC. (2015). *Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima Grupo Executivo do Comitê Interministerial de Mudança do Clima*. [https://www.mds.gov.br/webarquivos/arquivo/seguranca\\_alimentar/caisan/Publicacao/Caisan\\_Nacional/PlanoNacionaldeAdaptacaoMudancadoClima\\_Junho2015.pdf](https://www.mds.gov.br/webarquivos/arquivo/seguranca_alimentar/caisan/Publicacao/Caisan_Nacional/PlanoNacionaldeAdaptacaoMudancadoClima_Junho2015.pdf)
- MCTIC. (2016). *Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima: Vol. III* (p. 336). <https://doi.org/http://sirene.mcti.gov.br/documents/1686653/1706739/Volume+3.pdf/355d4a1e-9f3c-474a-982e-b4a63312813b>
- MCTIC. (2021). Quarta comunicação Nacional do Brasil à UNFCCC. In *Governo Federal. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação* (Vol. 4, Issue 1). <https://doi.org/10.35699/2525-3263.2020.26344>
- Metroclima. (n.d.). *IAG Station*. Retrieved January 15, 2022, from <http://www.metroclima.iag.usp.br/stations/iag/>
- Miller, B. G. (2011). The Effect of Coal Usage on Human Health and the Environment. In *Clean Coal Engineering Technology* (pp. 85–132). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-710-8.00004-2>
- Molina, L. T. (2021). Introductory lecture: air quality in megacities. *The Royal Society of Chemistry*, 9–52. <https://doi.org/10.1039/d0fd00123f>
- Nara, H., Tanimoto, H., Tohjima, Y., Mukai, H., Nojiri, Y., Katsumata, K., & Rella, C. W. (2012). Effect of air composition (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar, and H<sub>2</sub>O) on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> measurement by wavelength-scanned cavity ring-down spectroscopy: Calibration and measurement strategy. *Atmospheric Measurement Techniques*, *5*(11), 2689–2701. <https://doi.org/10.5194/amt-5-2689-2012>

- Nations, U., of Economic, D., Affairs, S., & Division, P. (2018). *World Urbanization Prospects The 2018 Revision*. <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>
- Oliveira, A. P., Bornstein, R. D., & Soares, J. (2003). Annual and diurnal wind patterns in the city of São Paulo. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*, 3(5–6), 3–15. <https://doi.org/10.1023/A:1026090103764>
- ONU. (2015). Transforming Our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development United Nations United Nations Transforming Our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development. In *United Nations*. <https://sdgs.un.org/publications/transforming-our-world-2030-agenda-sustainable-development-17981>
- Pérez-Martínez, P. J., Miranda, R. M., Nogueira, T., Guardani, M. L., Fornaro, A., Ynoue, R., & Andrade, M. F. (2014). Emission factors of air pollutants from vehicles measured inside road tunnels in São Paulo: case study comparison. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(8), 2155–2168. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0562-7>
- LEI Nº 12.187, DE 29 DE DEZEMBRO DE 2009, (2009) (testimony of PNMC). [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm)
- Pongratz, J., Reick, C. H., Raddatz, T., & Claussen, M. (2009). *Effects of anthropogenic land cover change on the carbon cycle of the last millennium*. <https://doi.org/10.1029/2009GB003488>
- Pulles, T., & Heslinga, D. (2007). *The Art of Emission Inventorying* (Vol. 1, p. 69). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2082.8007>
- Raymond, P. A., & Cole, J. J. (2003). Increase in the export of alkalinity from North America's largest river. *Science*, 301(5629), 88–91. [https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1083788/SUPPL\\_FILE/RAYMOND.SOM.PDF](https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1083788/SUPPL_FILE/RAYMOND.SOM.PDF)
- Reum, F., Gerbig, C., Lavric, J., Rella, C., & Göckede, M. (2017). An improved water correction function for Picarro greenhouse gas analyzers. *Atmospheric Measurement Techniques*. <https://doi.org/10.5194/amt-2017-174>
- Reum, F., Gerbig, C., Lavric, J. V., Rella, C. W., & Göckede, M. (2019). Correcting atmospheric CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> mole fractions obtained with Picarro analyzers for sensitivity of cavity pressure to water vapor. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(2). <https://doi.org/10.5194/amt-12-1013-2019>
- Ribeiro, F. N. D., Oliveira, A. P. d., Soares, J., Miranda, R. M. d., Barlage, M., & Chen, F. (2018). Effect of sea breeze propagation on the urban boundary layer of the metropolitan region of Sao Paulo, Brazil. *Atmospheric Research*, 214, 174–188.

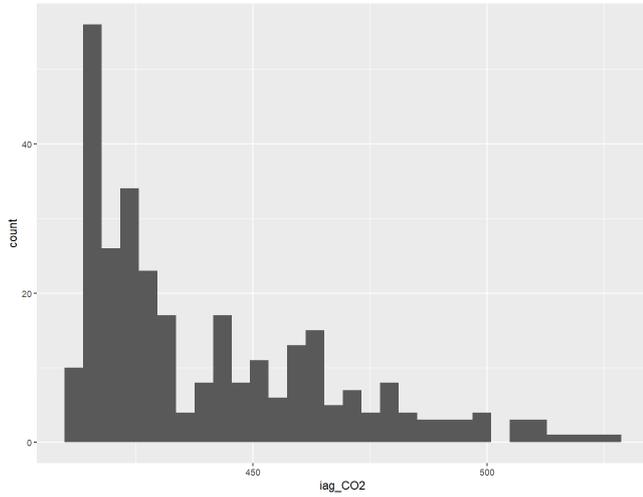
- <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2018.07.015>
- Richardson, S. J., Miles, N. L., Davis, K. J., Crosson, E. R., Rella, C. W., & Andrews, A. E. (2012). Field testing of cavity ring-down spectroscopy analyzers measuring carbon dioxide and water vapor. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29(3), 397–406. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00063.1>
- Rozante, J. R., Rozante, V., Alvim, D. S., Manzi, A. O., Chiquetto, J. B., D'Amelio, M. T. S., & Moreira, D. S. (2017). Variations of carbon monoxide concentrations in the Megacity of São Paulo from 2000 to 2015 in different time Scales. *Atmosphere*, 8(5), 21. <https://doi.org/10.3390/atmos8050081>
- São Paulo, E. de. (2009). *Lei nº 13.798, de 09 de novembro de 2009*. Assembleia Legislativa Do Estado de São Paulo; Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo. <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2009/lei-13798-09.11.2009.html>
- São Paulo, E. de. (2013). *Decreto n.59.113, de 23 de Abril de 2013*. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2013/decreto-59113-23.04.2013.html>
- SEEG. (2020). Seeg 8 - Análise Das Emissões Brasileiras De Gases De Efeito Estufa E Suas Implicações Para As Metas De Clima Do Brasil 1970-2019. In I. Albuquerque, A. Alencar, C. Angelo, T. Azevedo, F. Barcellos, I. Coluna, C. C. Junior, M. Cremer, M. Piatto, R. Potenza, G. Quintana, J. Shimbo, D. Tsai, & B. Zimbres (Eds.), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 3, Issue 3). Observatório do Clima. [https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2020/11/SEEG8\\_DOC\\_ANALITICO\\_SINTESE\\_1990-2019.pdf](https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2020/11/SEEG8_DOC_ANALITICO_SINTESE_1990-2019.pdf)
- SEEG. (2021). Análise das emissões brasileiras de e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020 gases de efeito estufa. In R. F. Potenza, G. O. Quintana, A. M. Cardoso, D. S. Tsai, M. S. Cremer, F. B. Silva, K. C. I. Coluna, J. Shimbo, C. Silva, E. Souza, B. Zimbres, A. A. C. Angelo, & T. Azevedo (Eds.), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 14, Issue 5). [https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos/Analiticos/SEEG\\_9/OC\\_03\\_relatorio\\_2021\\_FINAL.pdf](https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos/Analiticos/SEEG_9/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf)
- Seeg Brasil*. (n.d.). Retrieved March 13, 2022, from <http://seeg.eco.br/nota-de-precaucao>
- Smith, W. K., & Berry, Z. C. (2013). Sunflecks? *Tree Physiology*, 33(3), 233–237. <https://doi.org/10.1093/TREEPHYS/TPT005>
- Sundquist, E. T. (1986). Geologic Analogs: Their Value and Limitations in Carbon Dioxide Research. In J. R. Trabalka & D. E. Reichle (Eds.), *The Changing Carbon Cycle: A Global Analysis* (pp. 371–402). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1915->

- Tranvik, L. J., Downing, J. A., Cotner, J. B., Loiselle, S. A., Striegl, R. G., Ballatore, T. J., Dillon, P., Finlay, K., Fortino, K., Knoll, L. B., Kortelainen, P. L., Kutser, T., Larsen, S., Laurion, I., Leech, D. M., Leigh McCallister, S., McKnight, D. M., Melack, J. M., Overholt, E., ... Weyhenmeyer, G. A. (2009). Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography*, *54*(6 PART 2), 2298–2314. [https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6\\_part\\_2.2298](https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298)
- Turnbull, J. C., Karion, A., Davis, K. J., Lauvaux, T., Miles, N. L., Richardson, S. J., Sweeney, C., McKain, K., Lehman, S. J., Gurney, K. R., Patarasuk, R., Liang, J., Shepson, P. B., Heimburger, A., Harvey, R., & Whetstone, J. (2019). Synthesis of Urban CO<sub>2</sub> Emission Estimates from Multiple Methods from the Indianapolis Flux Project (INFLUX) [Research-article]. *Environmental Science and Technology*, *53*(1), 287–295. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05552>
- Turnbull, J. C., Sweeney, C., Karion, A., Newberger, T., Lehman, S. J., Tans, P. P., Davis, K. J., Lauvaux, T., Miles, N. L., Richardson, S. J., Cambaliza, M. O., Shepson, P. B., Gurney, K., Patarasuk, R., & Razlivanov, I. (2015). Toward quantification and source sector identification of fossil fuel CO<sub>2</sub> emissions from an urban area: Results from the INFLUX experiment. *Journal of Geophysical Research*, *120*(1), 292–312. <https://doi.org/10.1002/2014JD022555>
- UNFCCC. (2015). ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT. In *Conference of the Parties*. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>
- UNFCCC. (2022). *FEDERATIVE REPUBLIC OF BRAZIL Paris Agreement NATIONALLY DETERMINED CONTRIBUTION (NDC)*. [https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Brazil First/Updated - First NDC - FINAL - PDF.pdf](https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Brazil%20First/Updated%20First%20NDC%20-%20FINAL%20-%20PDF.pdf)
- Vara-Vela, A., de Fátima Andrade, M., Zhang, Y., Kumar, P., Ynoue, R. Y., Souto-Oliveira, C. E., da Silva Lopes, F. J., & Landulfo, E. (2018). Modeling of Atmospheric Aerosol Properties in the São Paulo Metropolitan Area: Impact of Biomass Burning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *123*(17), 9935–9956. <https://doi.org/10.1029/2018JD028768>
- Vemado, F., José, A., & Filho, P. (2016). *Severe Weather Caused by Heat Island and Sea Breeze Effects in the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil*. <https://doi.org/10.1155/2016/8364134>
- Verhulst, K. R., Karion, A., Kim, J., Salameh, P. K., Keeling, R. F., Newman, S., Miller, J.,

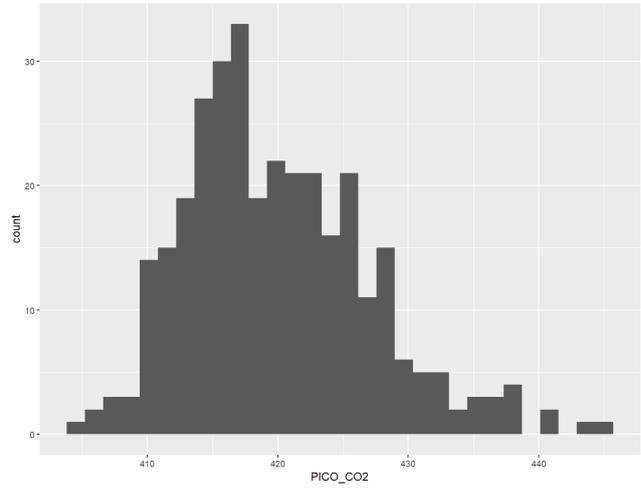
- Sloop, C., Pongetti, T., Rao, P., Wong, C., Hopkins, F. M., Yadav, V., Weiss, R. F., Duren, R. M., & Miller, C. E. (2017). Carbon dioxide and methane measurements from the Los Angeles Megacity Carbon Project – Part 1: calibration, urban enhancements, and uncertainty estimates. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *17*(13), 8313–8341. <https://doi.org/10.5194/acp-17-8313-2017>
- Viatte, C., Lauvaux, T., Hedelius, J. K., Parker, H., Chen, J., Jones, T., Franklin, J. E., Deng, A. J., Gaudet, B., Verhulst, K., Duren, R., Wunch, D., Roehl, C., Dubey, M. K., Wofsy, S., & Wennberg, P. O. (2017). Methane emissions from dairies in the Los Angeles Basin. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *17*(12), 7509–7528. <https://doi.org/10.5194/acp-17-7509-2017>
- Wang, Y., Munger, J. W., Xu, S., Mcelroy, M. B., Hao, J., Nielsen, C. P., & Ma, H. (2010). CO<sub>2</sub> and its correlation with CO at a rural site near Beijing: implications for combustion efficiency in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *10*, 8881–8897. <https://doi.org/10.5194/acp-10-8881-2010>
- World Health Organization. (2016). Ambient Air Pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. *World Health Organization*, 1–131. <https://doi.org/9789241511353>
- World Meteorological Organization. (n.d.). *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Retrieved September 6, 2018, from <https://www.ipcc.ch/>
- Xiao, W., Liu, S., Li, H., Xiao, Q., Wang, W., Hu, Z., Hu, C., Gao, Y., Shen, J., Zhao, X., Zhang, M., & Lee, X. (2014). A flux-gradient system for simultaneous measurement of the CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, and H<sub>2</sub>O fluxes at a lake-air interface. *Environmental Science & Technology*, *48*(24), 14490–14498. <https://doi.org/10.1021/es5033713>
- Xueref-Remy, I., Dieudonné, E., Vuillemin, C., Lopez, M., Lac, C., Schmidt, M., Delmotte, M., Chevallier, F., Ravetta, F., Perrussel, O., Ciais, P., Bréon, F. M., Broquet, G., Ramonet, M., Gerard Spain, T., & Ampe, C. (2018). Diurnal, synoptic and seasonal variability of atmospheric CO<sub>2</sub> in the Paris megacity area. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *18*(5), 3335–3362. <https://doi.org/10.5194/acp-18-3335-2018>
- Zar, J. H. (1972). Significance testing of the spearman rank correlation coefficient. *Journal of the American Statistical Association*, *67*(339), 578–580. <https://doi.org/10.1080/01621459.1972.10481251>

## 10. ANEXOS

### 10.1. Anexo I



a) IAG



b) SPJ

*Figura 47 - Resultado do teste de normalidade para: a) IAG e b) SPJ*

## 10.2. Anexo II

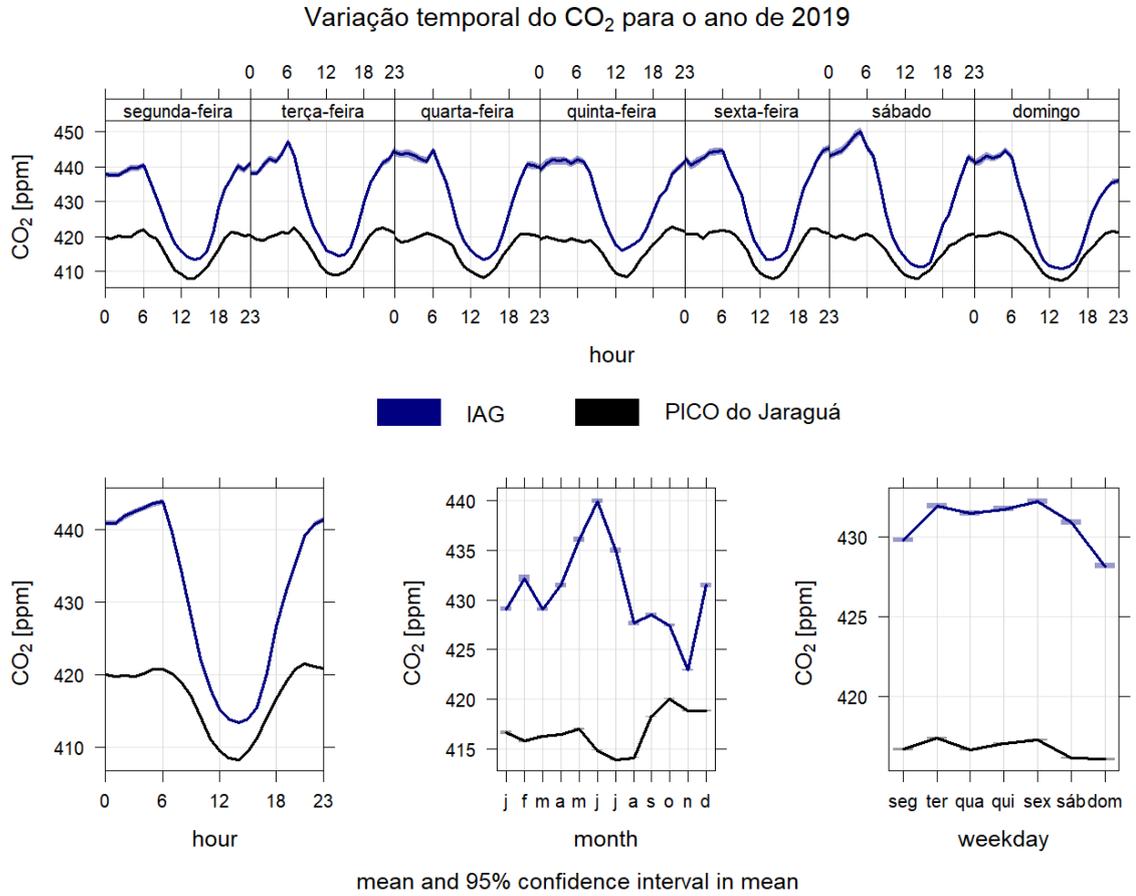


Figura 48 - Variações das concentrações de CO<sub>2</sub> horárias para os dias da semana, para o perfil horário do dia e a variação mensal, para ambos os sítios (em ppm) - Com os Finais de Semana inclusos

### 10.3. Anexo III

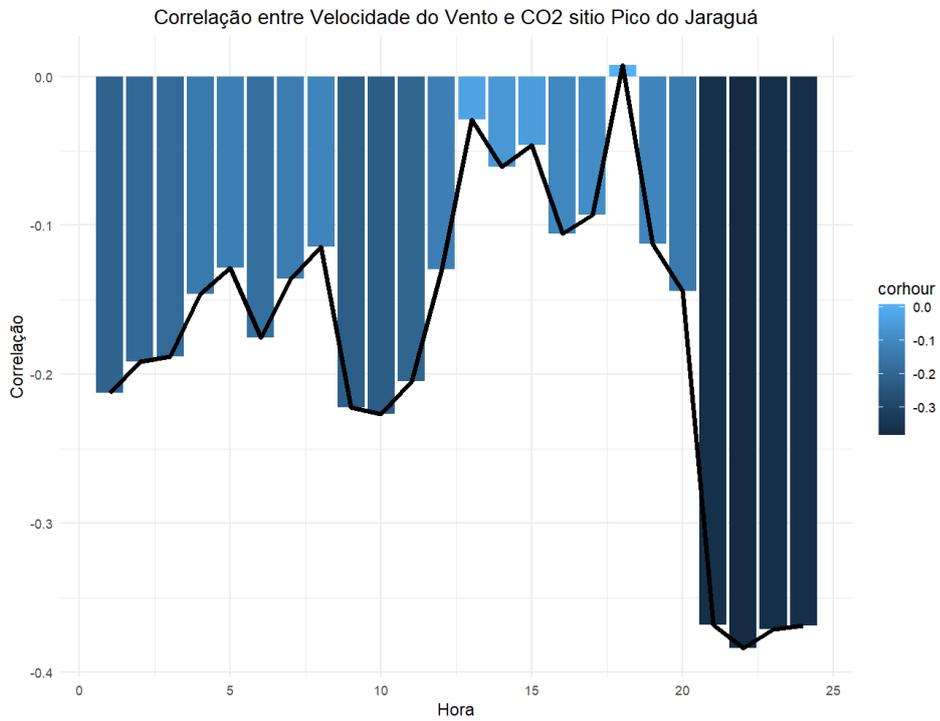


Figura 49 - Correlação horária da velocidade do vento (em  $m s^{-1}$ ) e a concentração do CO<sub>2</sub> no SPJ

### 10.4. Anexo IV

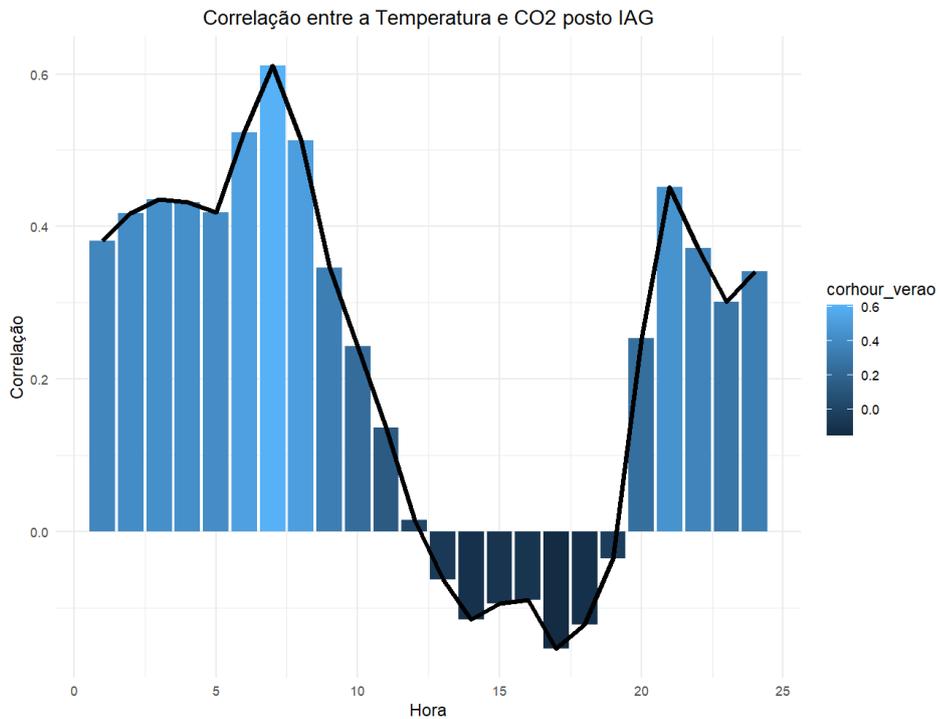


Figura 50 - Correlação horária entre as concentrações de CO<sub>2</sub> (em ppm) medidas no sítio do IAG e a temperatura (em °C), para os meses referentes ao verão.

## 10.5. Anexo V

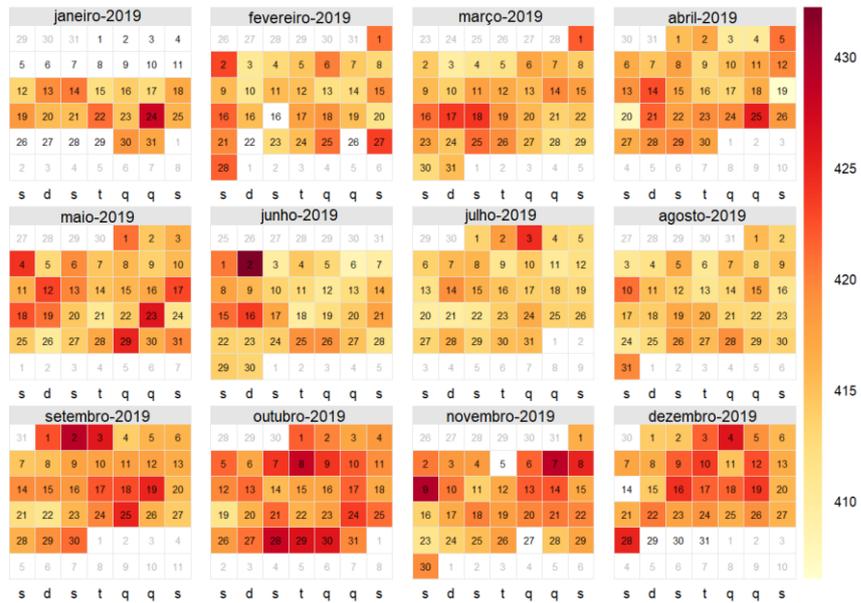


Figura 51 - Concentrações médias horárias de CO<sub>2</sub> (em ppm), por dia do ano em que se realizou a coleta de dados para o SPJ

## 10.6. Anexo VI

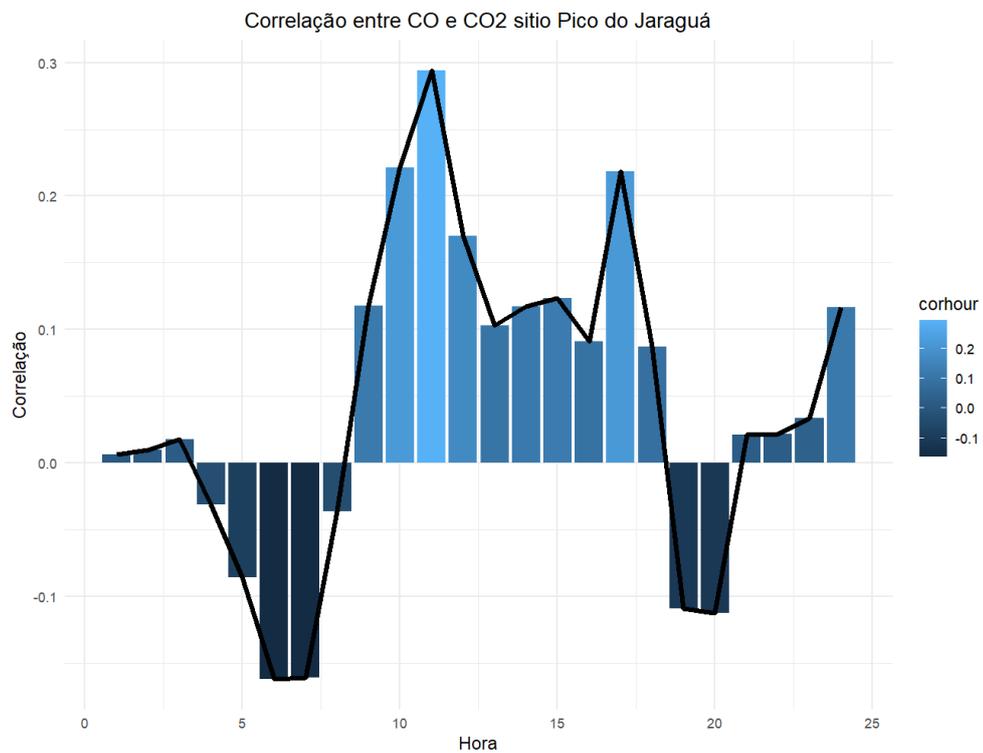


Figura 52 - Correlação horária entre o Co e o CO<sub>2</sub> para o SPJ

## 10.7. Anexo VII

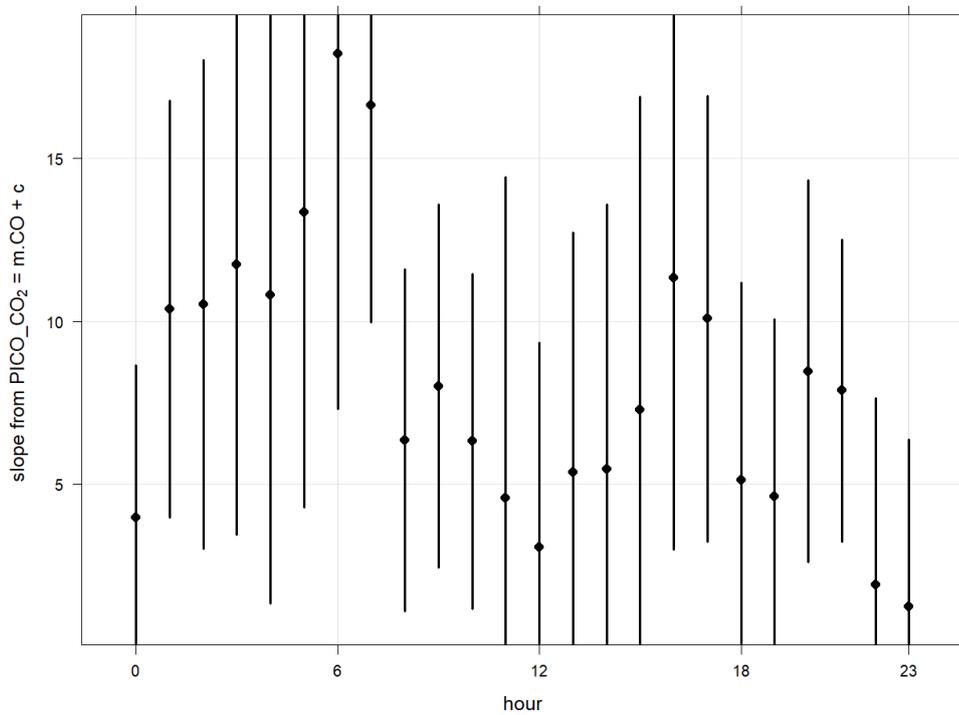
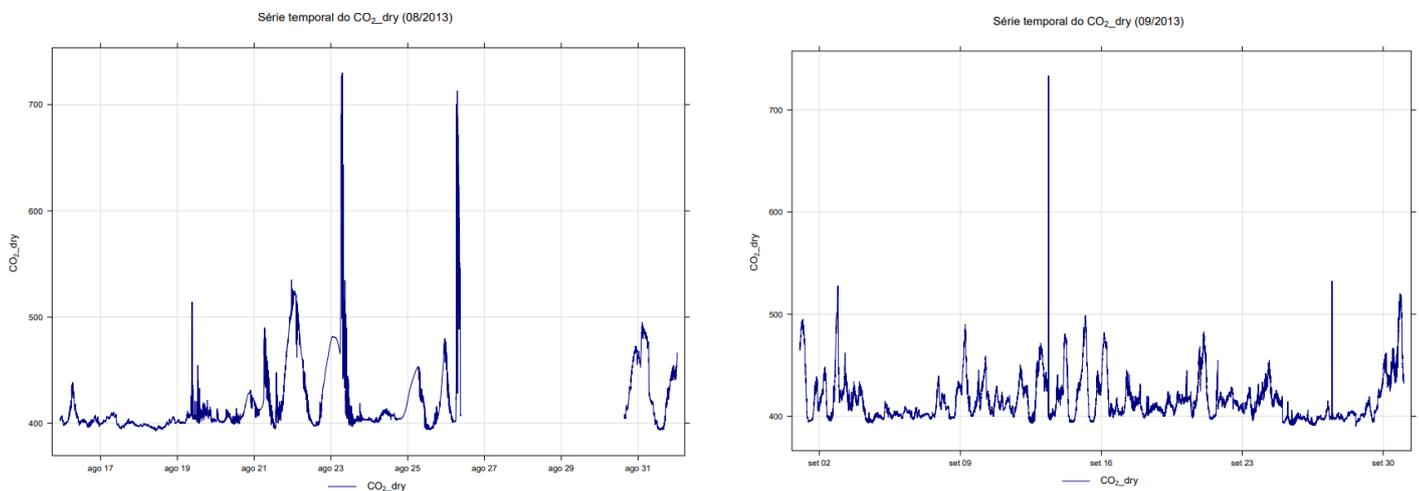


Figura 53 - Inclinações das retas de correlações horárias entre o  $CO_2$  e o  $CO$  para o SPJ durante os meses referentes ao verão. Onde no eixo y encontram-se os valores de quanto da massa de  $CO_2$  pode ser explicada pela massa de  $CO$  mais a adição de uma constante. No eixo x encontram-se os valores referentes as horas do dia.

## 10.8. Gráficos mensais de $CO_2$

### 10.8.1. IAG



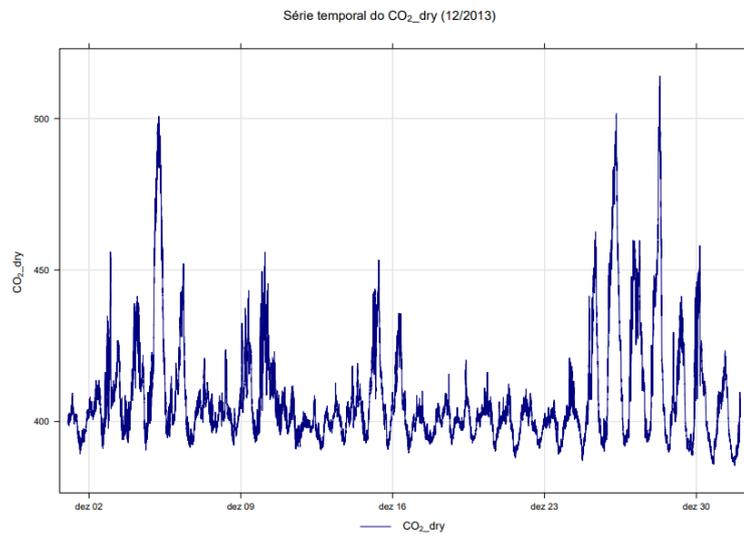
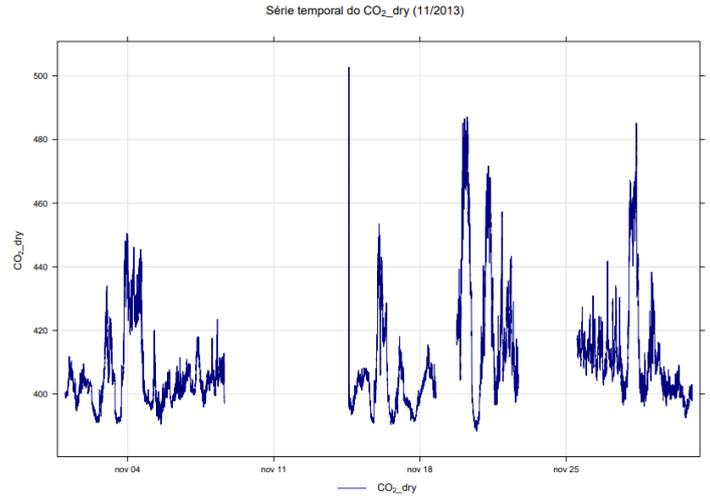
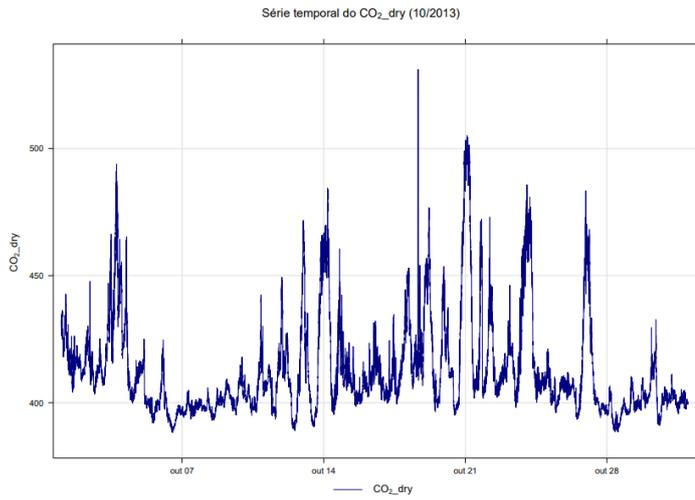
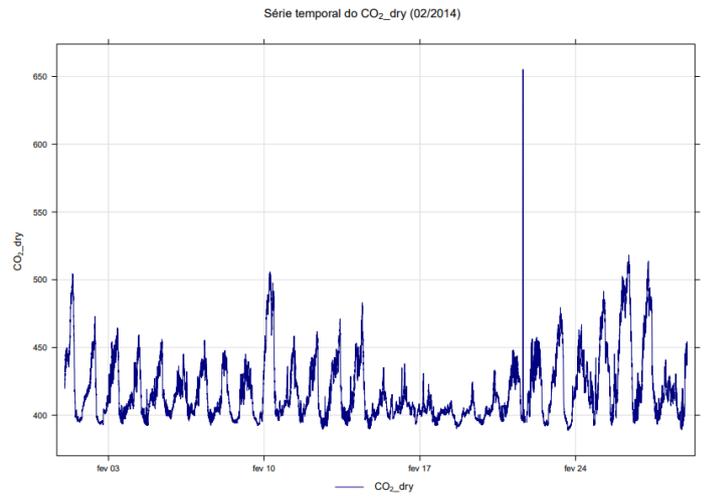
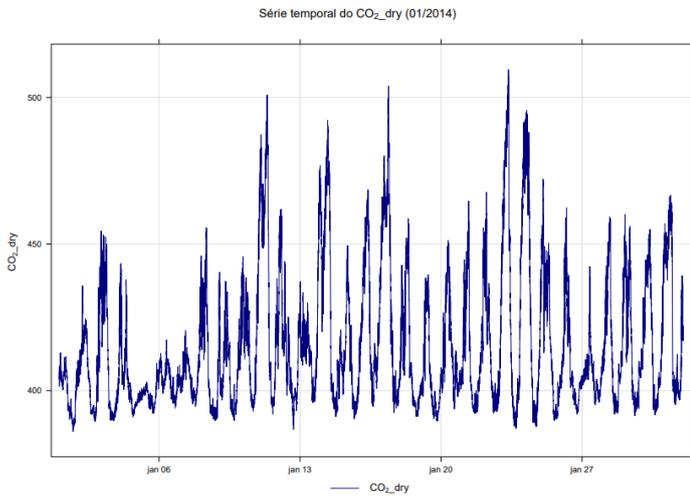
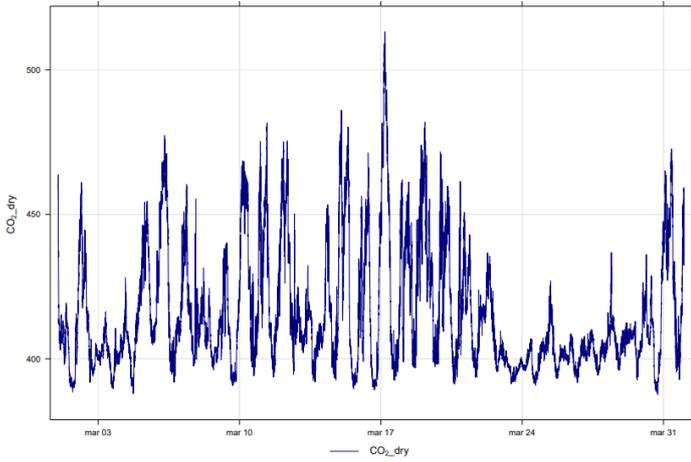


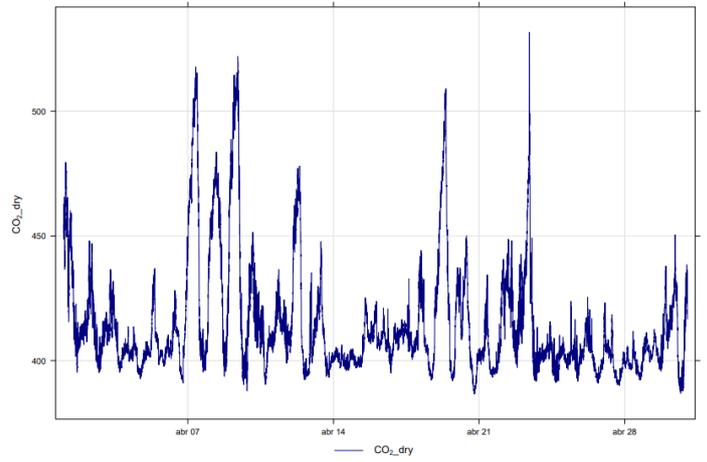
Figura 54 - Variação mensal das concentrações de CO<sub>2</sub> medidas no sítio do IAG no ano de 2013



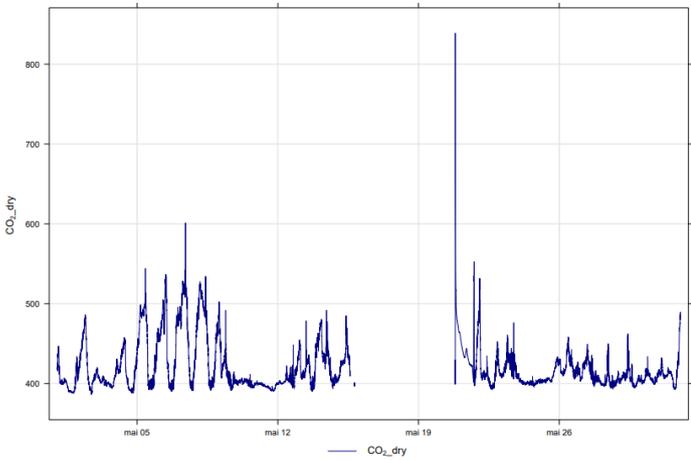
Série temporal do CO<sub>2</sub>\_dry (03/2014)



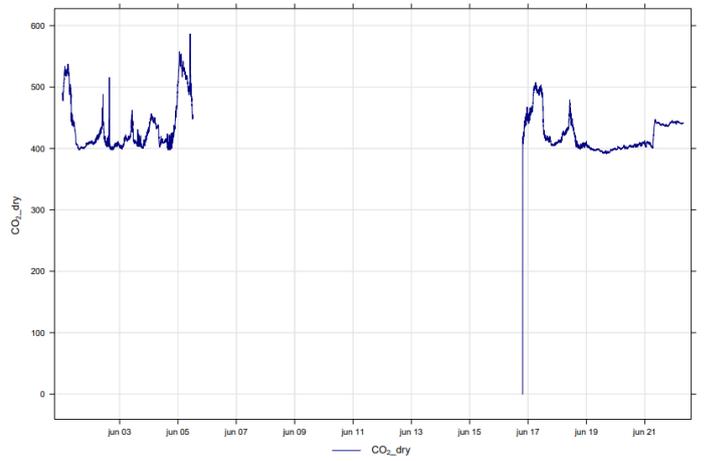
Série temporal do CO<sub>2</sub>\_dry (04/2014)



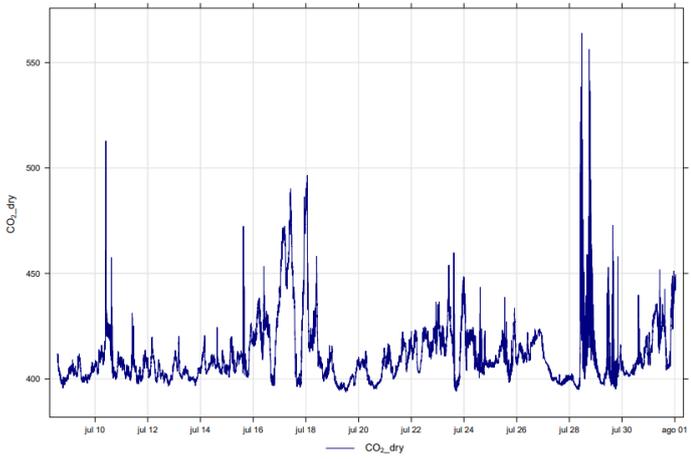
Série temporal do CO<sub>2</sub>\_dry (05/2014)



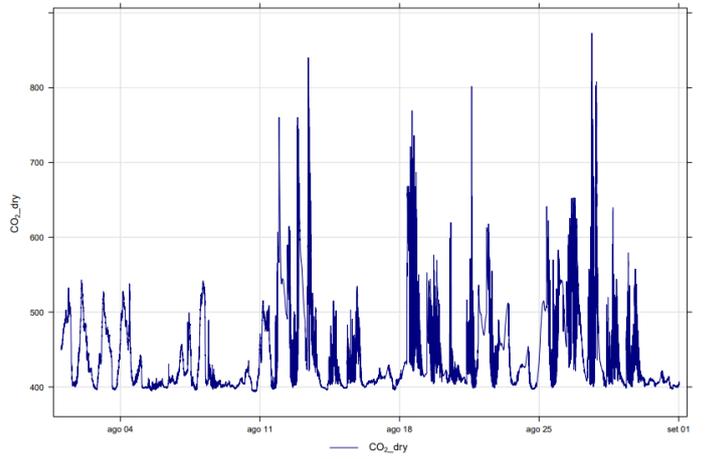
Série temporal do CO<sub>2</sub>\_dry (06/2014)



Série temporal do CO<sub>2</sub>\_dry (07/2014)



Série temporal do CO<sub>2</sub>\_dry (08/2014)



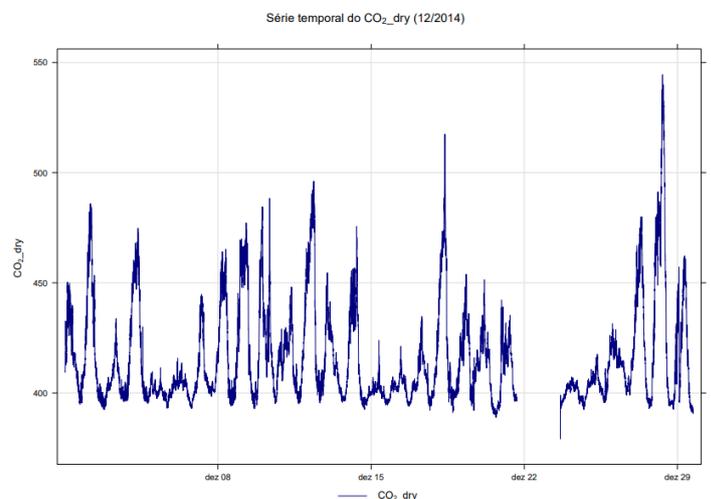
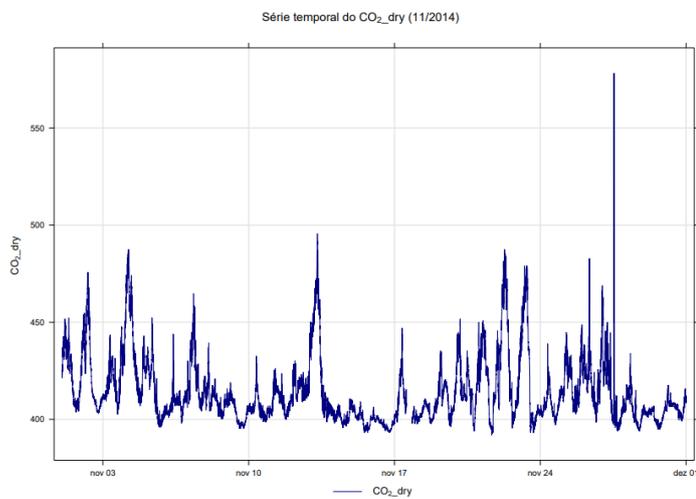
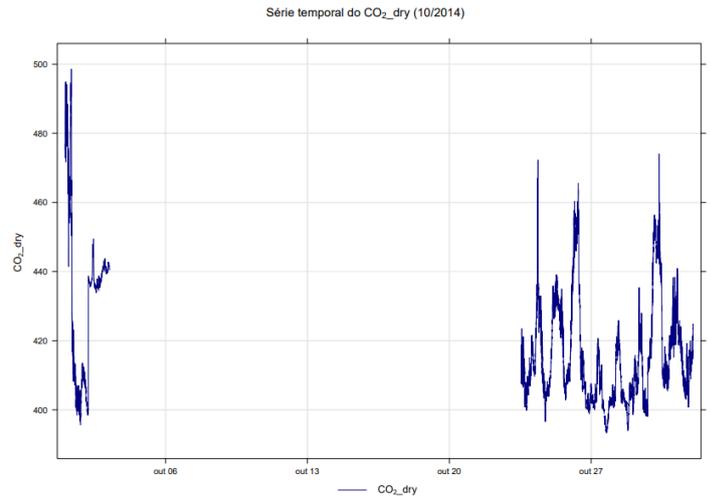
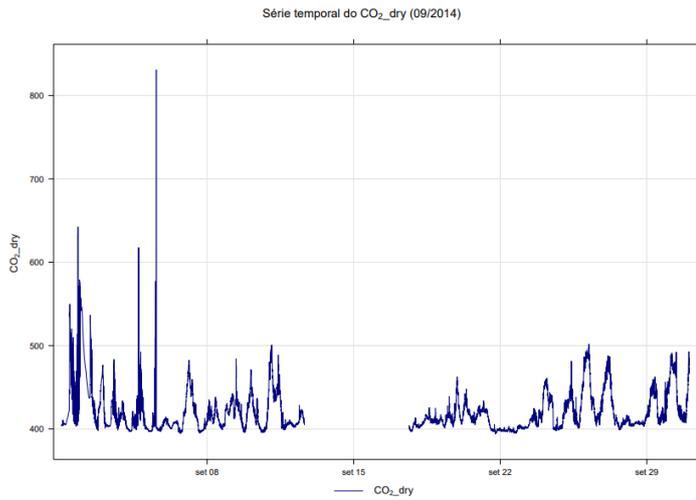
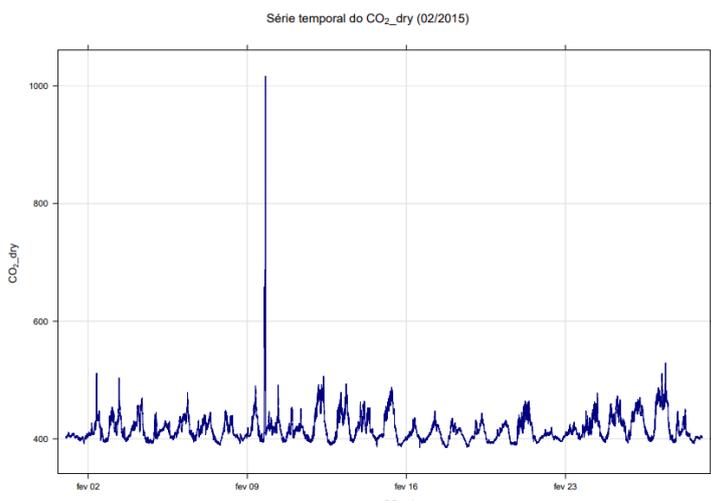
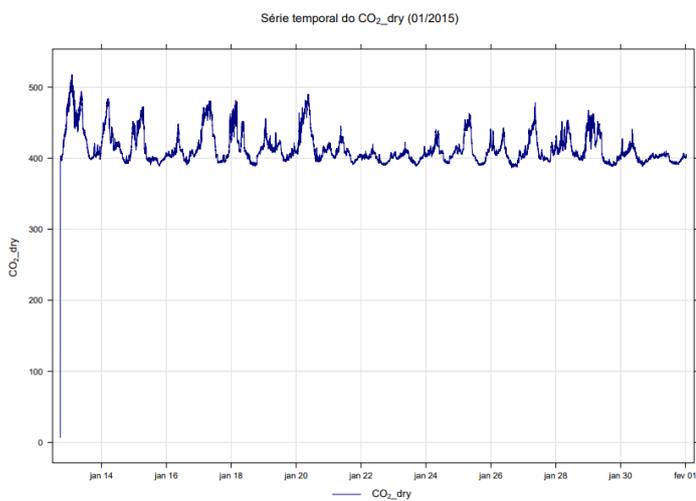


Figura 55 - Variação mensal das concentrações de CO<sub>2</sub> medidas no sitio do IAG no ano de 2014



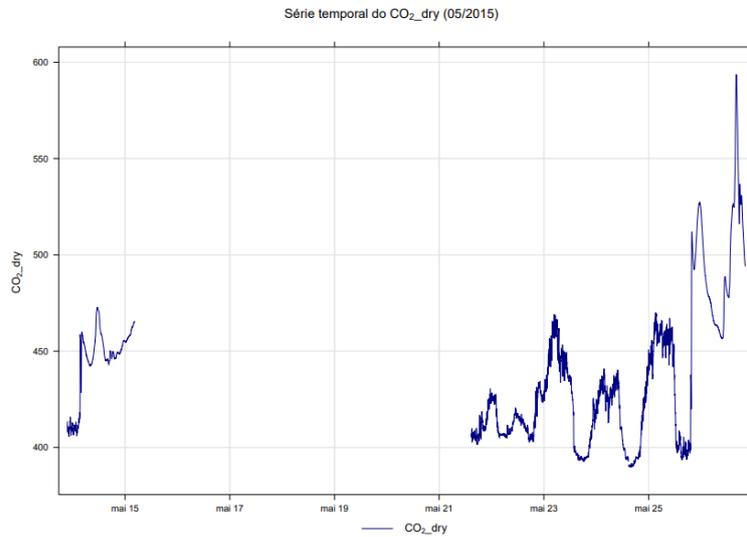
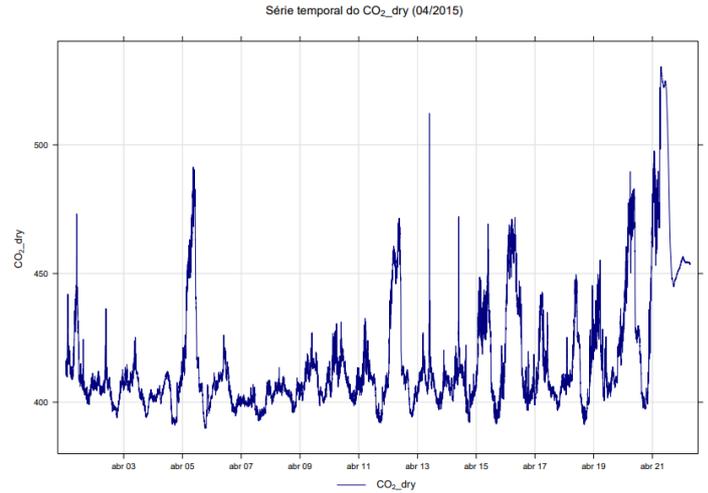
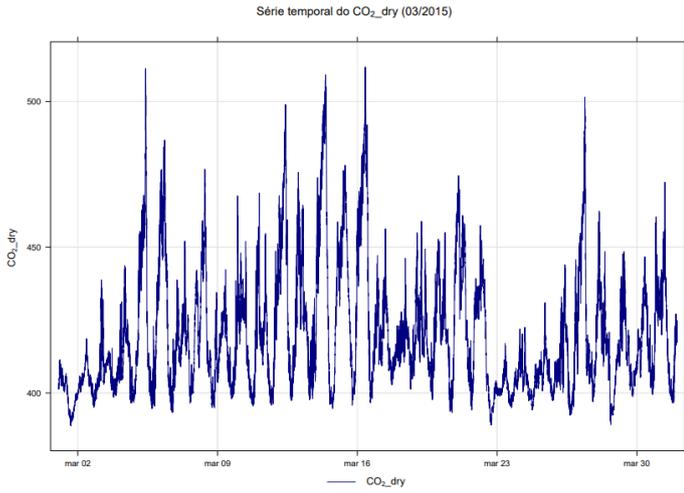
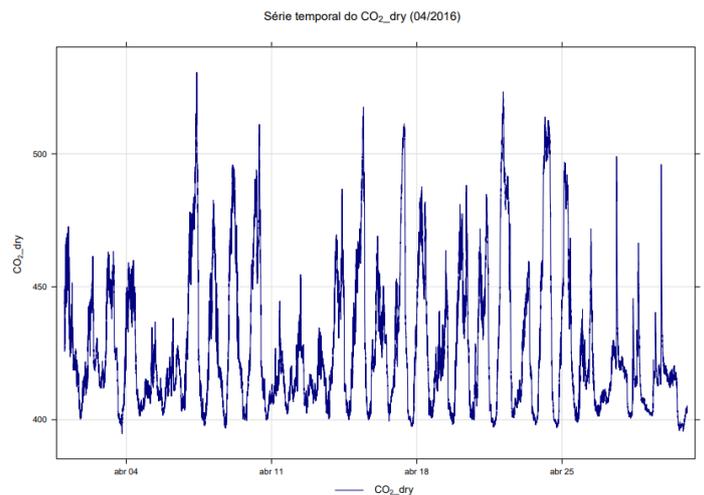
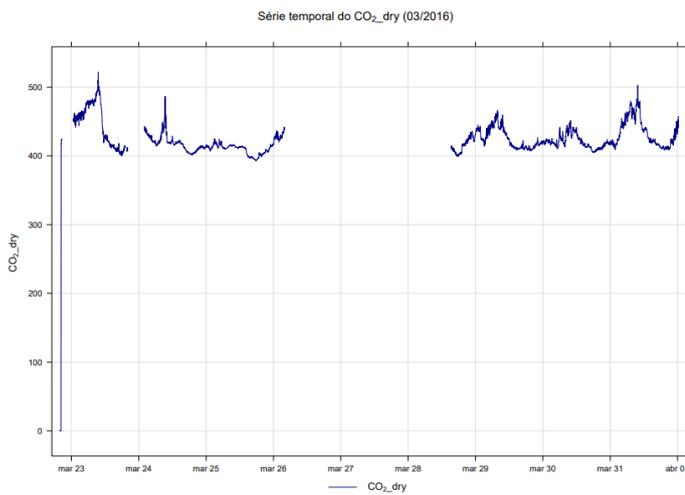
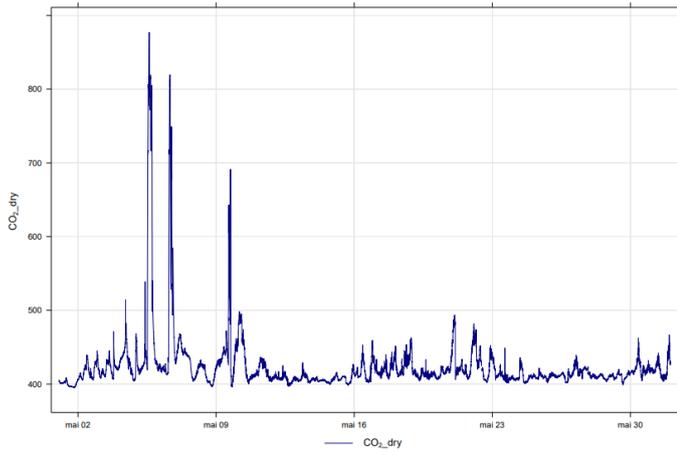


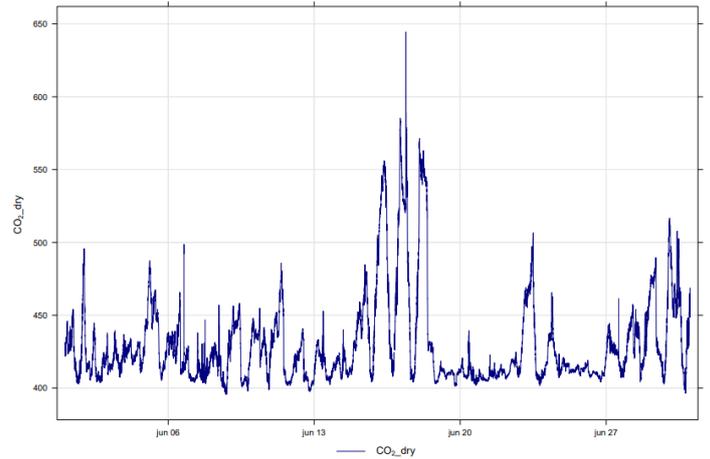
Figura 56- Variação mensal das concentrações de CO<sub>2</sub> medidas no sitio do IAG no ano de 2015



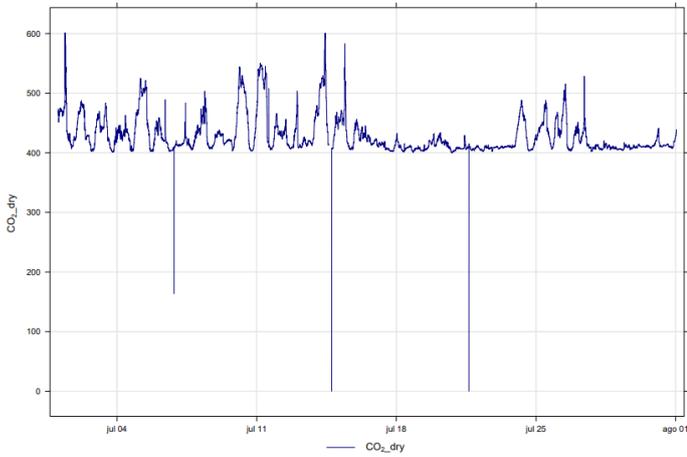
Série temporal do CO<sub>2</sub>\_dry (05/2016)



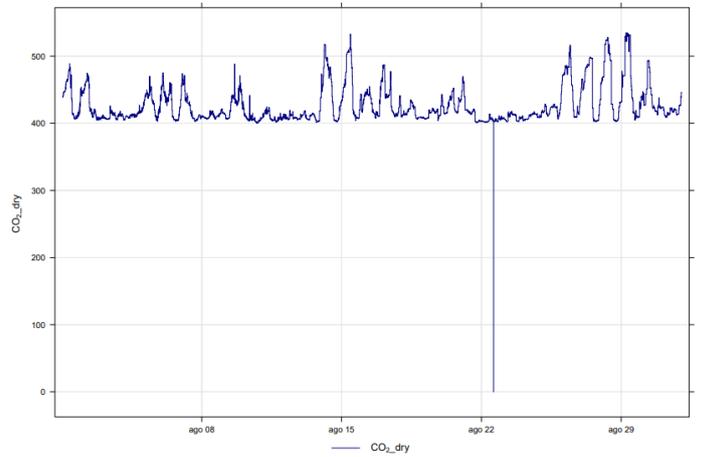
Série temporal do CO<sub>2</sub>\_dry (06/2016)



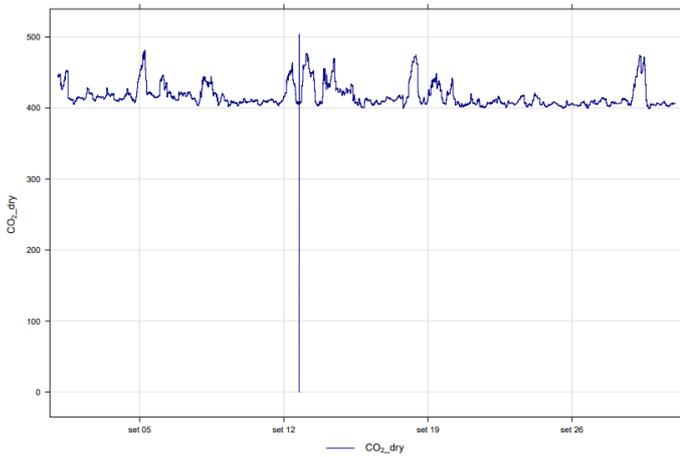
Série temporal do CO<sub>2</sub>\_dry (07/2016)



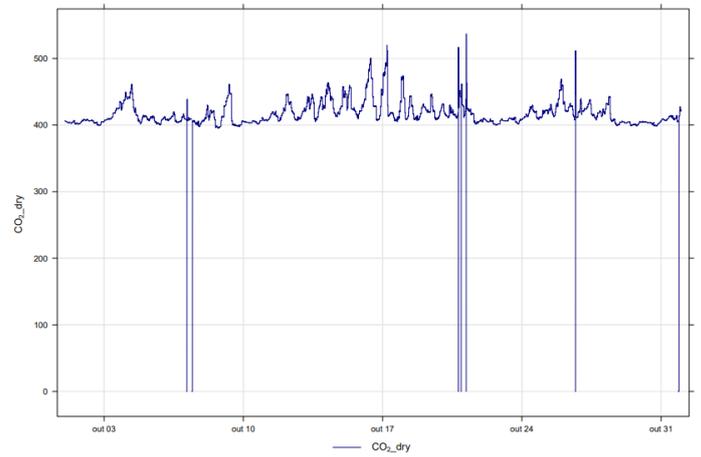
Série temporal do CO<sub>2</sub>\_dry (08/2016)



Série temporal do CO<sub>2</sub>\_dry (09/2016)



Série temporal do CO<sub>2</sub>\_dry (10/2016)



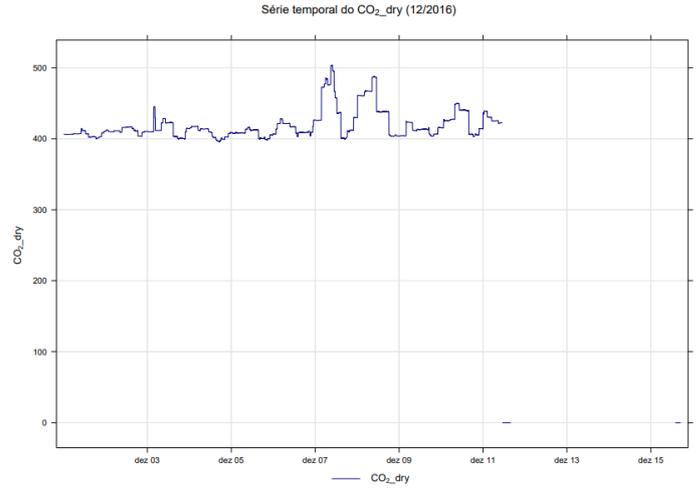
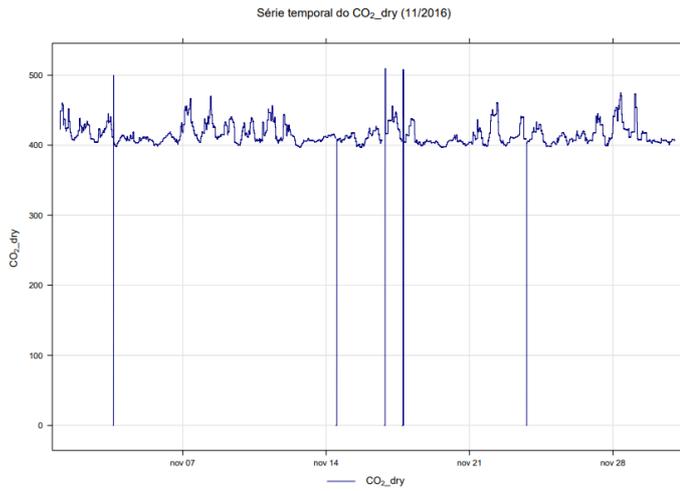
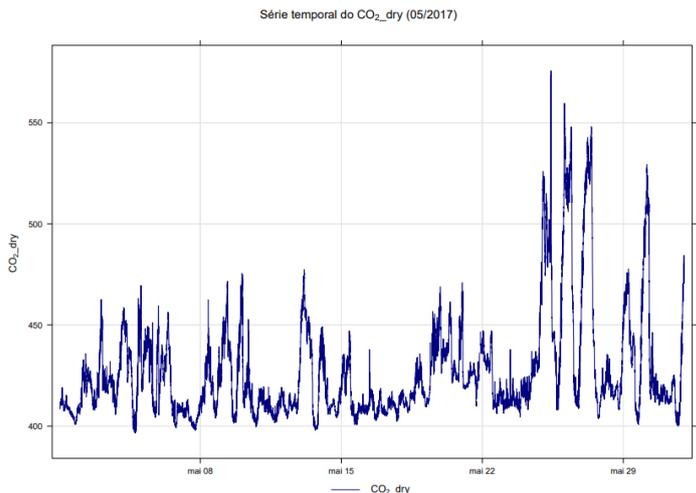
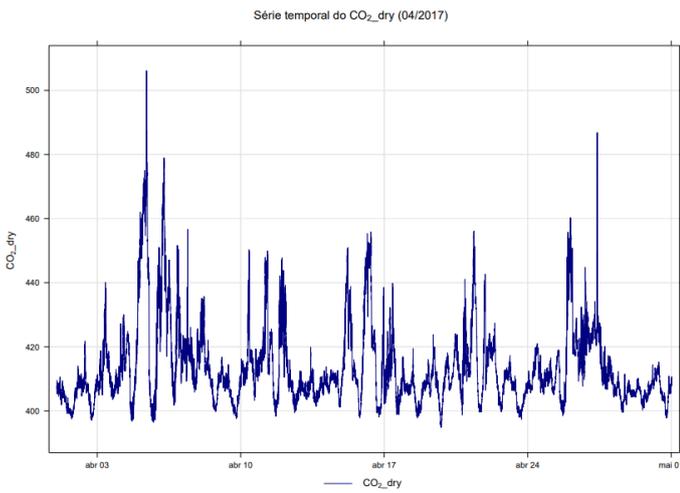
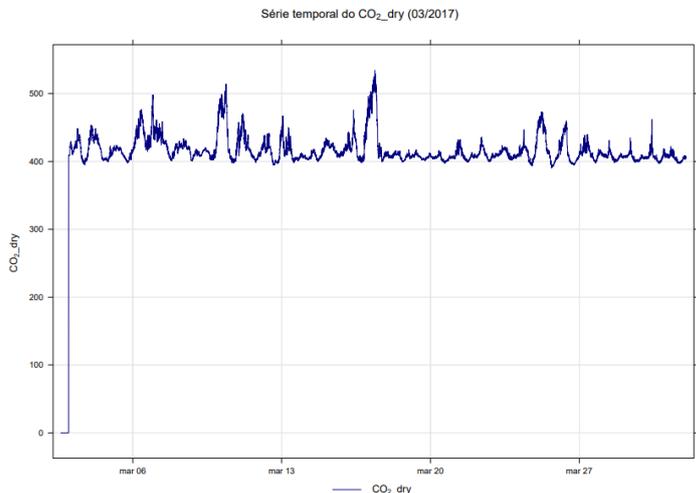
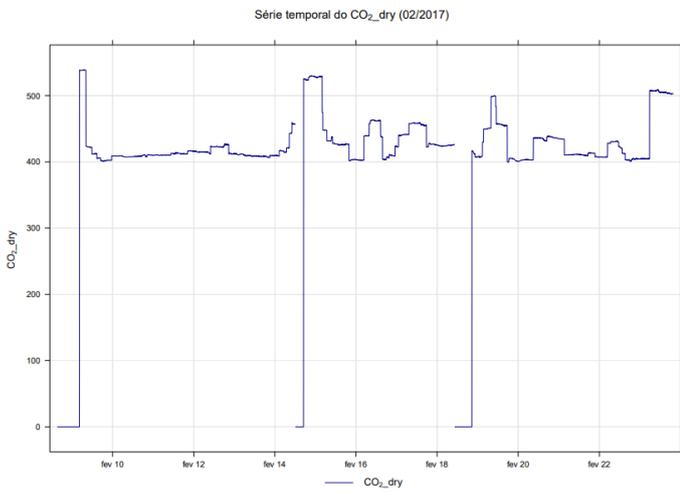
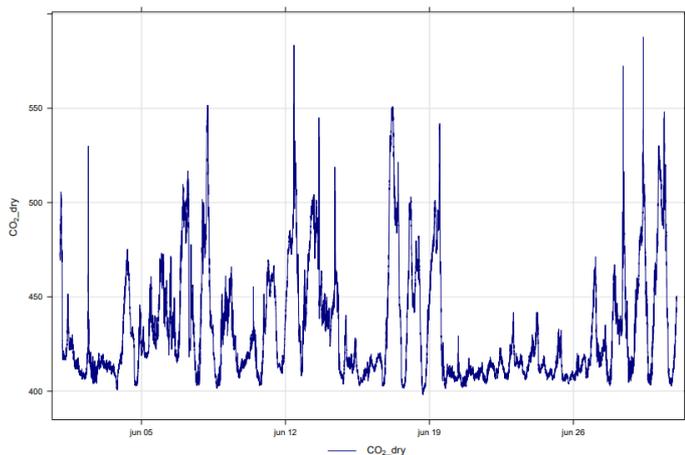


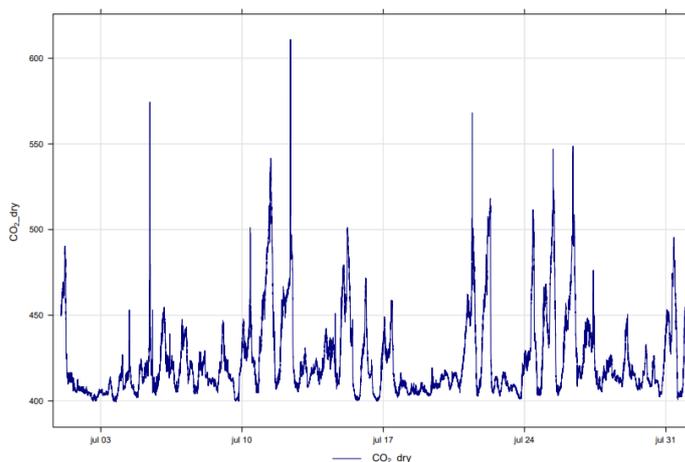
Figura 57 - Variação mensal das concentrações de CO<sub>2</sub> medidas no sítio do IAG no ano de 2016



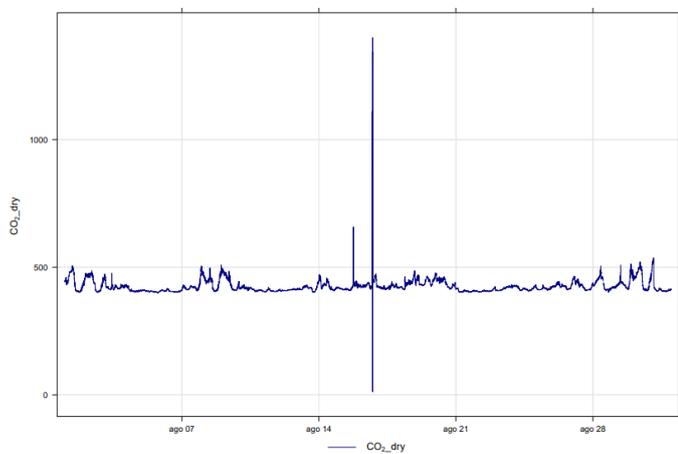
Série temporal do CO<sub>2</sub>\_dry (06/2017)



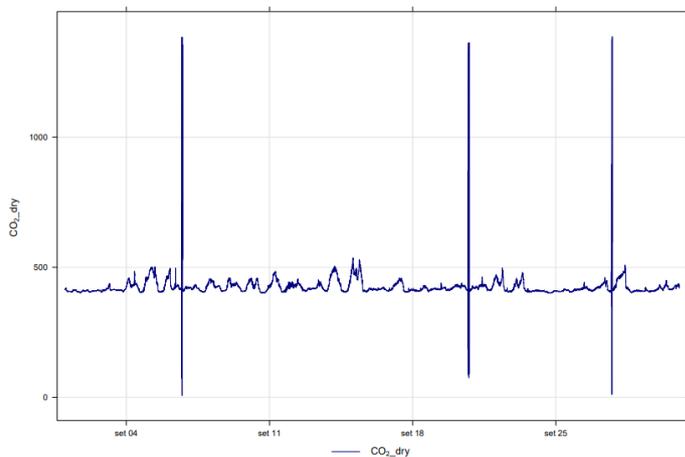
Série temporal do CO<sub>2</sub>\_dry (07/2017)



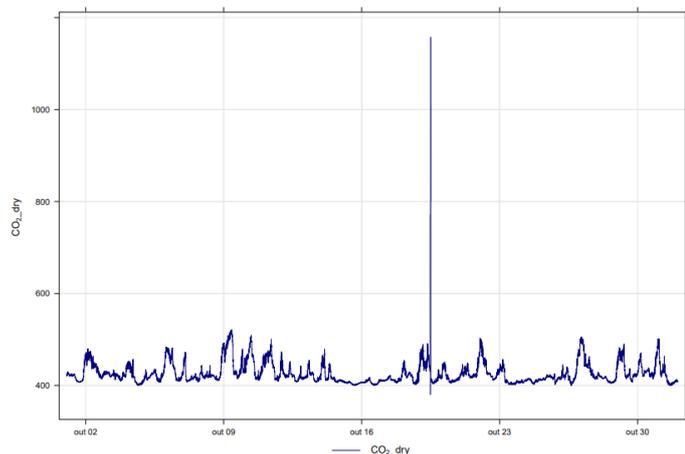
Série temporal do CO<sub>2</sub>\_dry (08/2017)



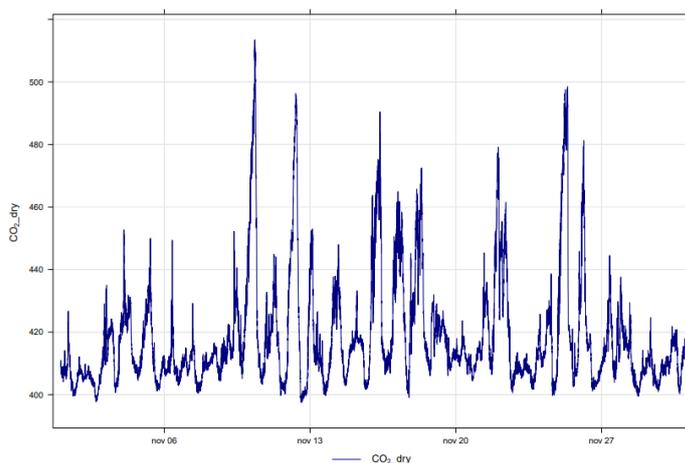
Série temporal do CO<sub>2</sub>\_dry (09/2017)



Série temporal do CO<sub>2</sub>\_dry (10/2017)



Série temporal do CO<sub>2</sub>\_dry (11/2017)



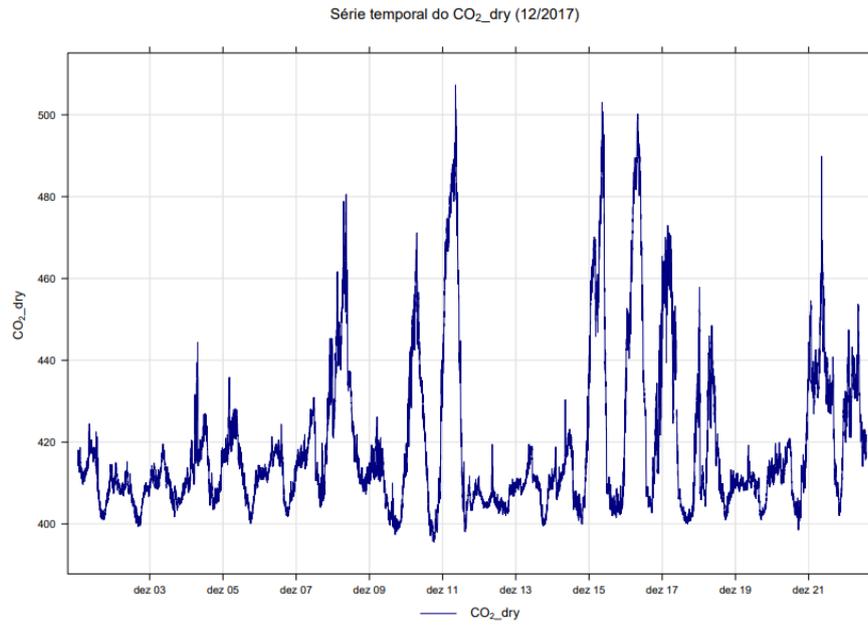
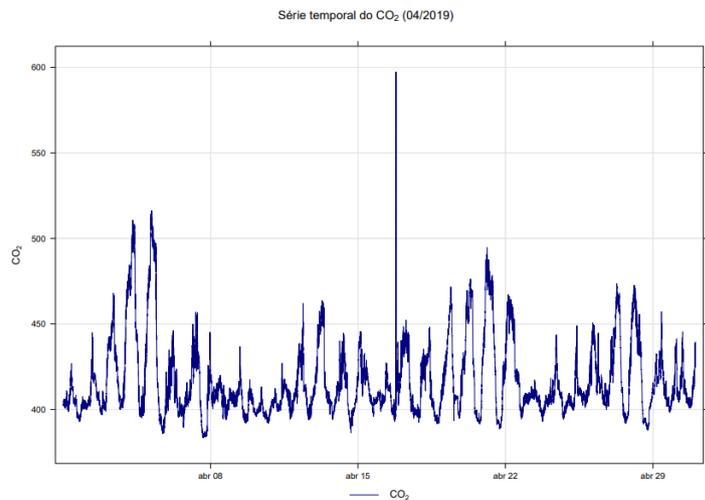
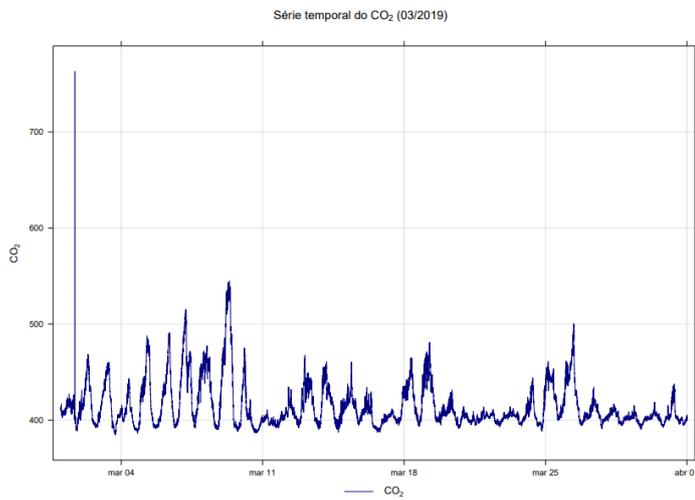
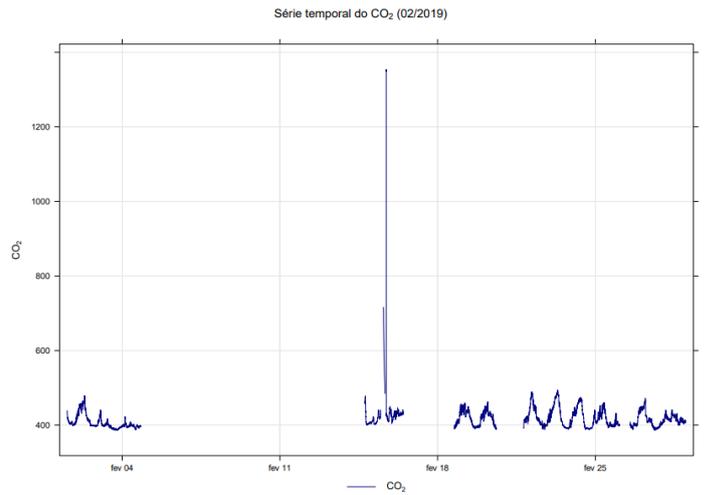
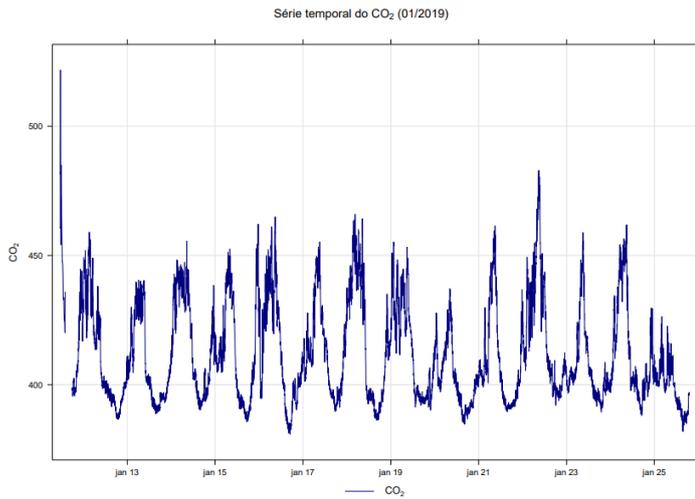
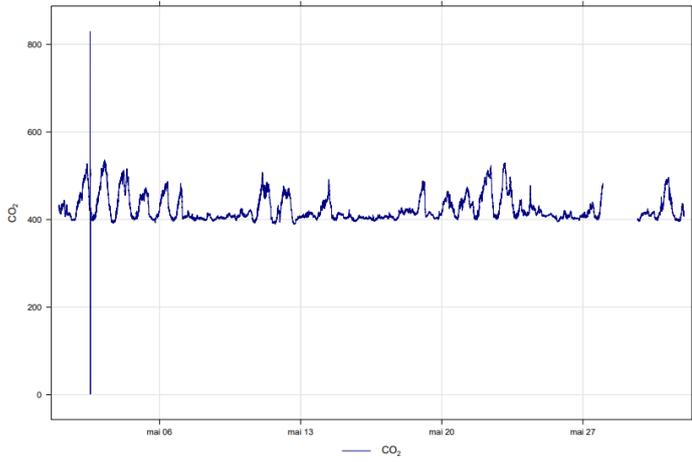


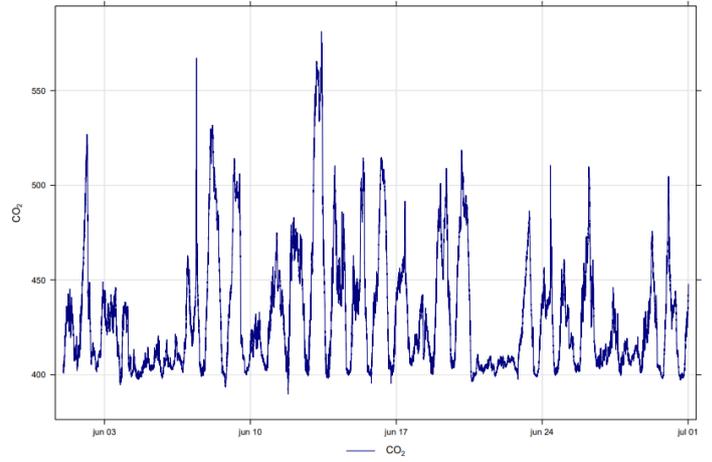
Figura 58 - Variação mensal das concentrações de CO<sub>2</sub> medidas no sítio do IAG no ano de 2017



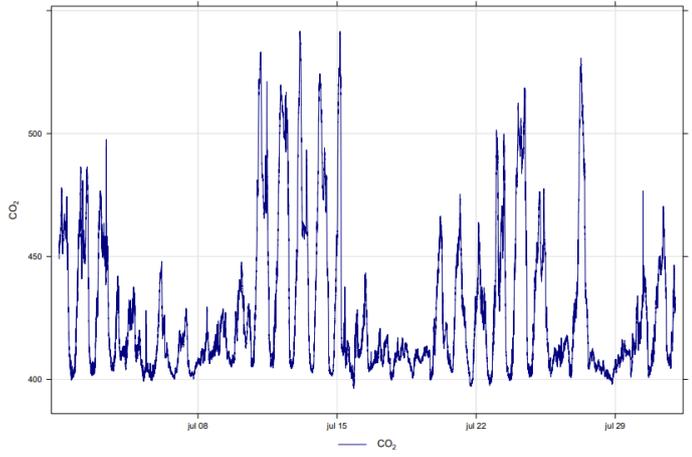
Série temporal do CO<sub>2</sub> (05/2019)



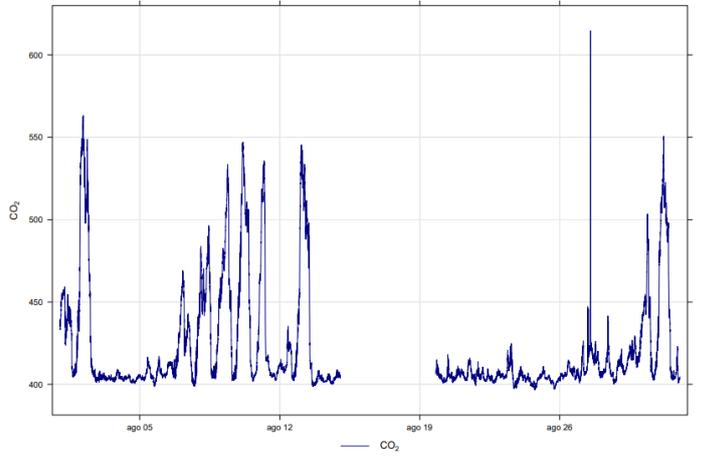
Série temporal do CO<sub>2</sub> (06/2019)



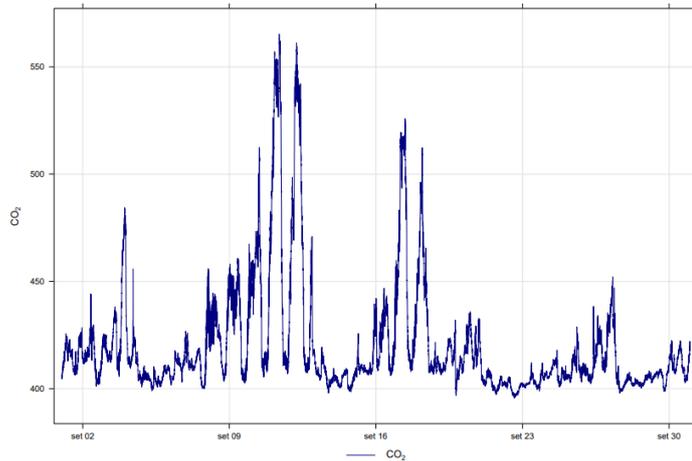
Série temporal do CO<sub>2</sub> (07/2019)



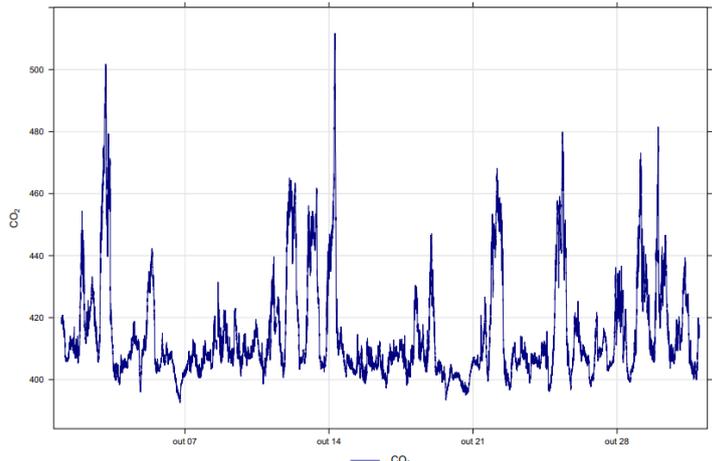
Série temporal do CO<sub>2</sub> (08/2019)



Série temporal do CO<sub>2</sub> (09/2019)



Série temporal do CO<sub>2</sub> (10/2019)



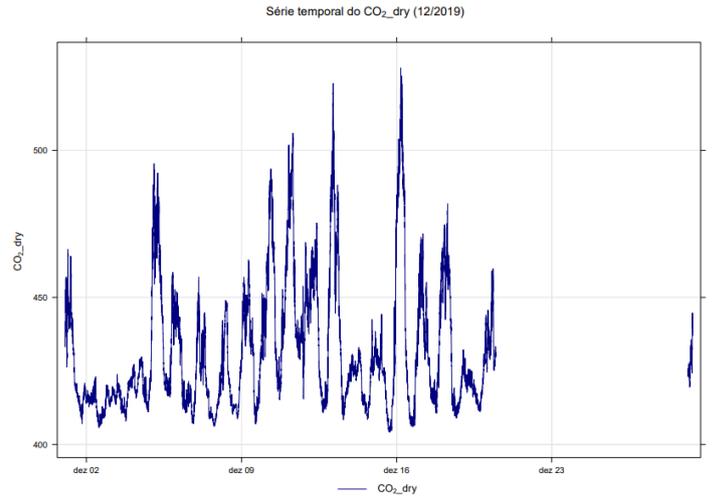
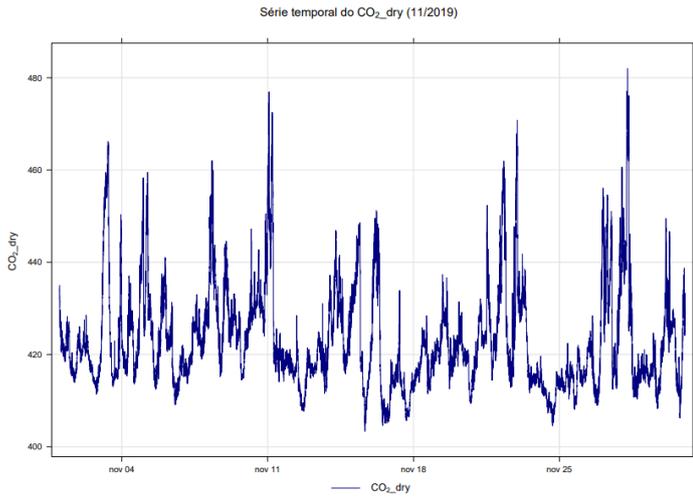
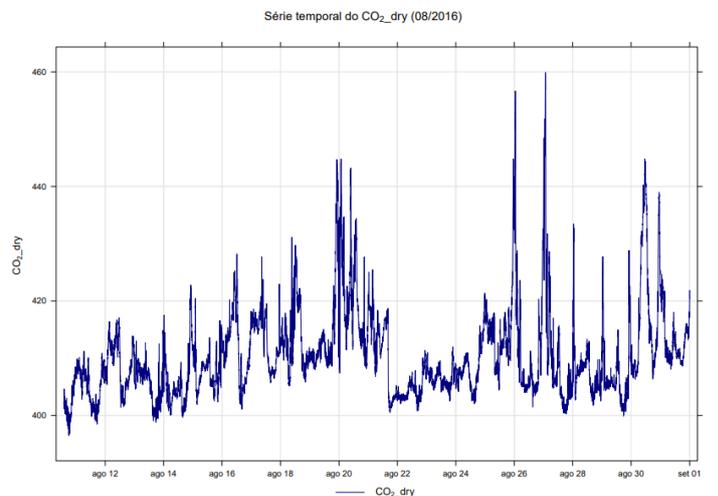
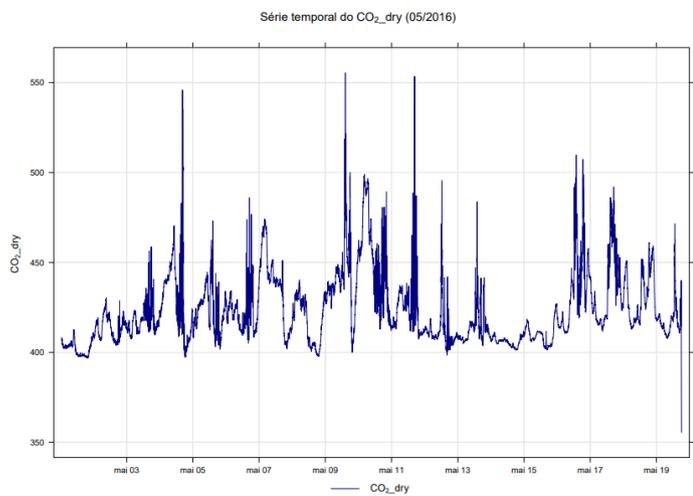
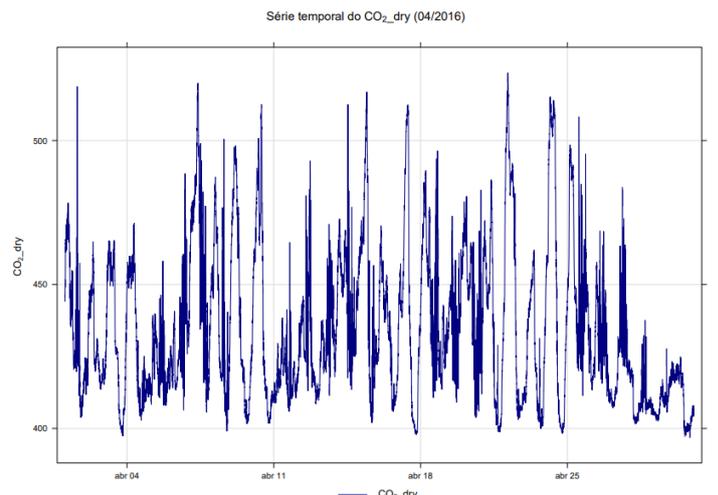
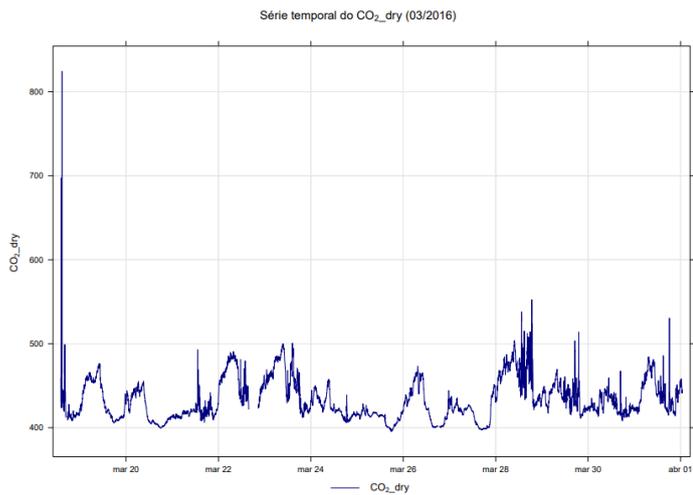


Figura 59 - Variação mensal das concentrações de CO<sub>2</sub> medidas no sitio do IAG no ano de 2019

### 10.8.2. Pico do Jaraguá



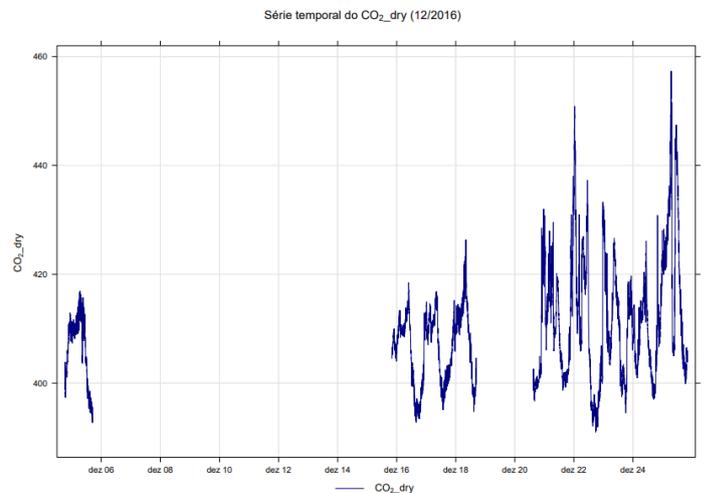
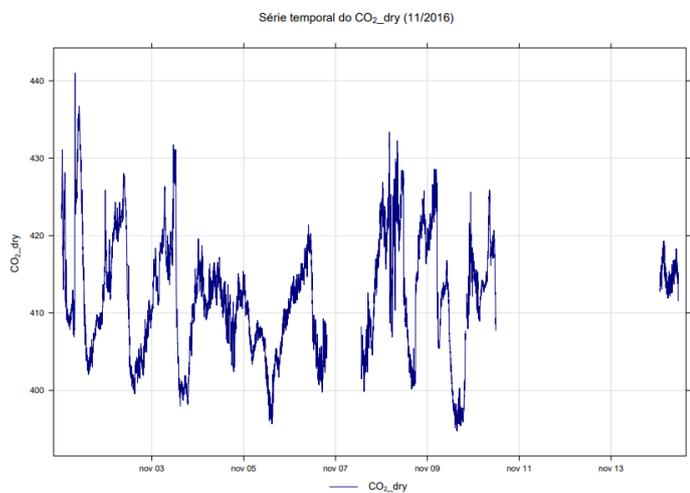
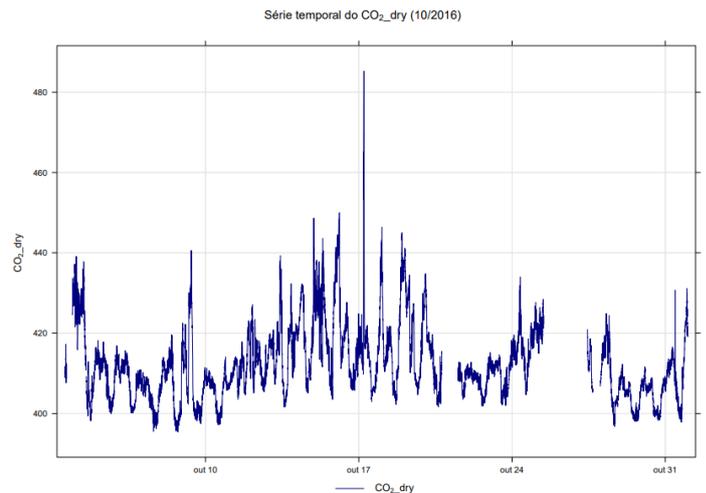
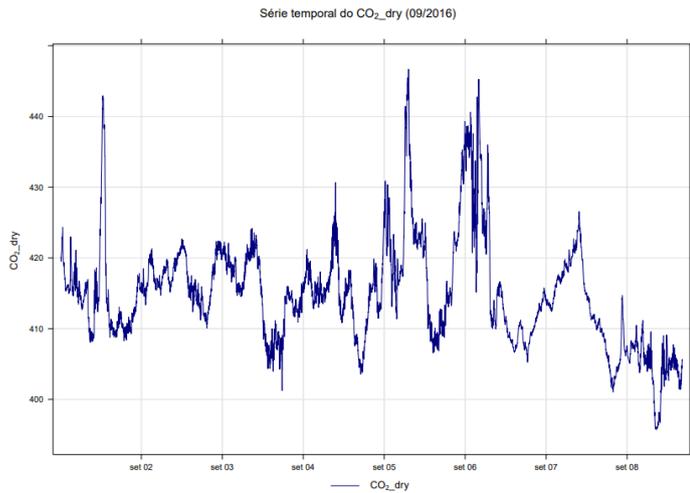
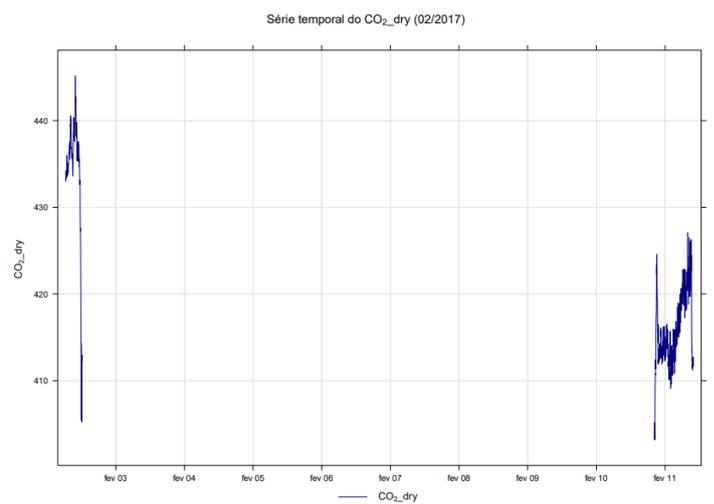
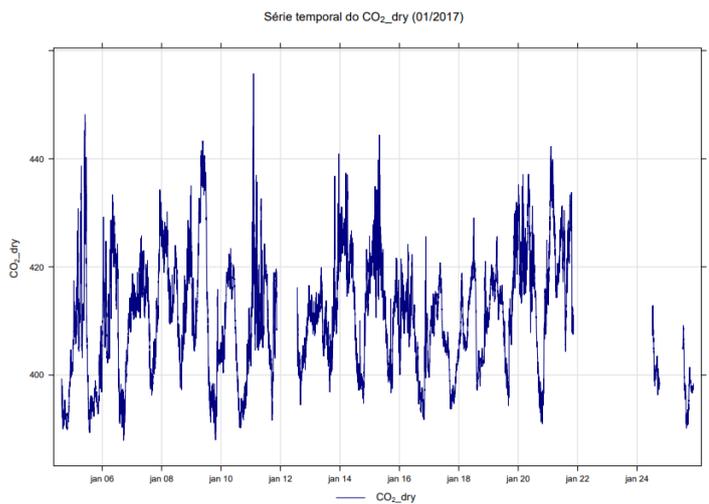


Figura 60 - Variação mensal das concentrações de CO<sub>2</sub> medidas no sítio do Pico do Jaraguá no ano de 2016



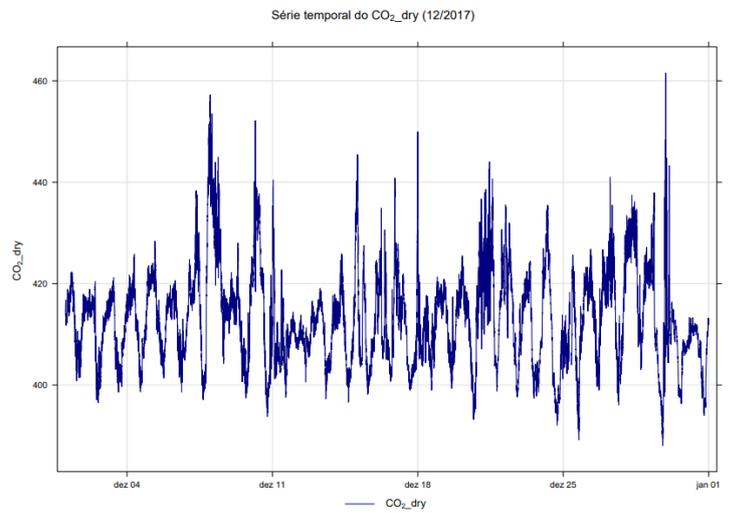
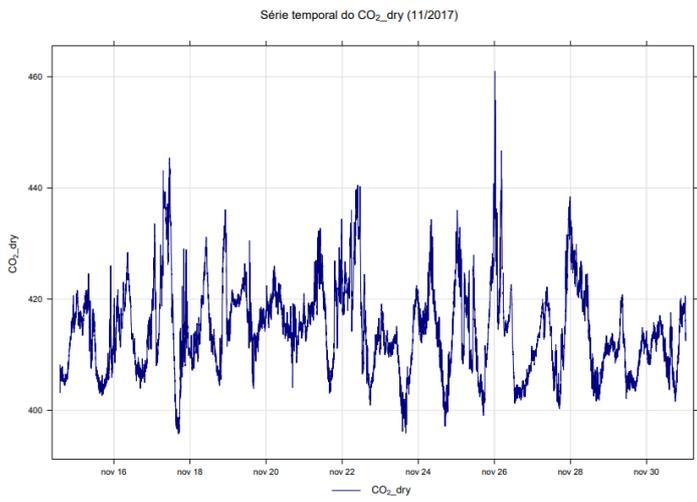
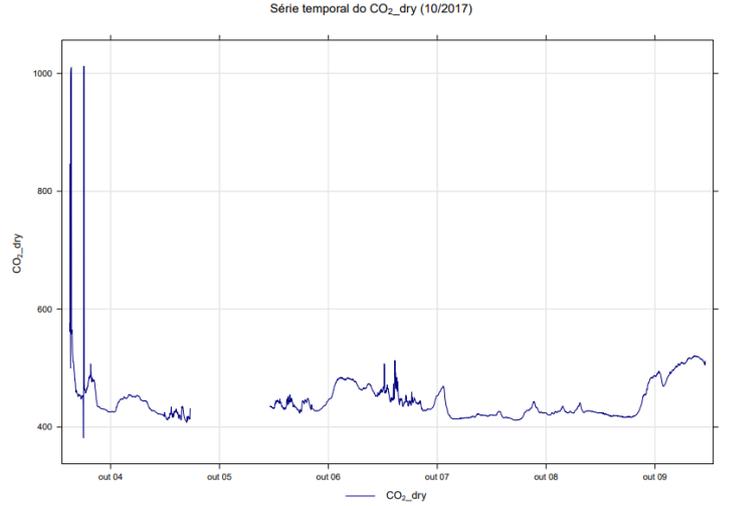
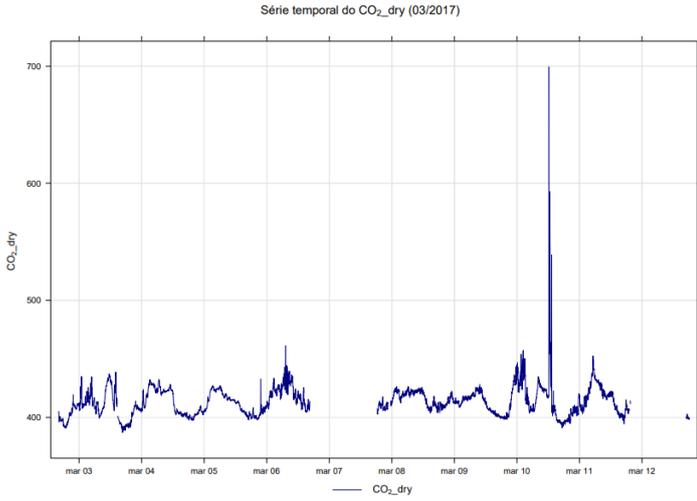
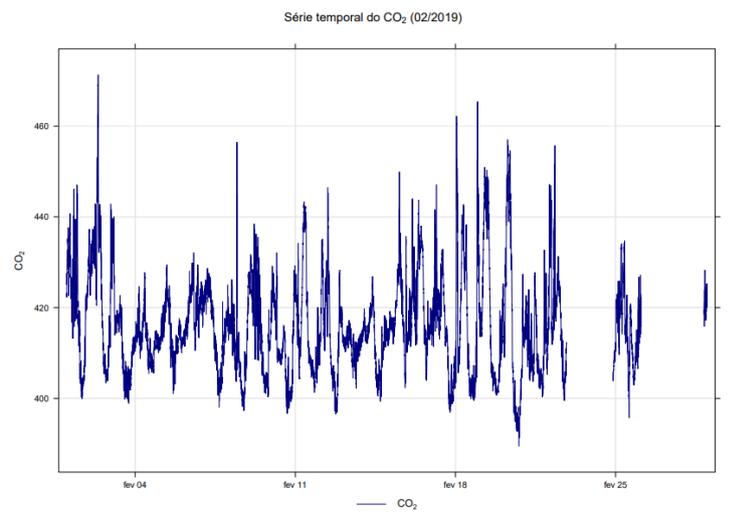
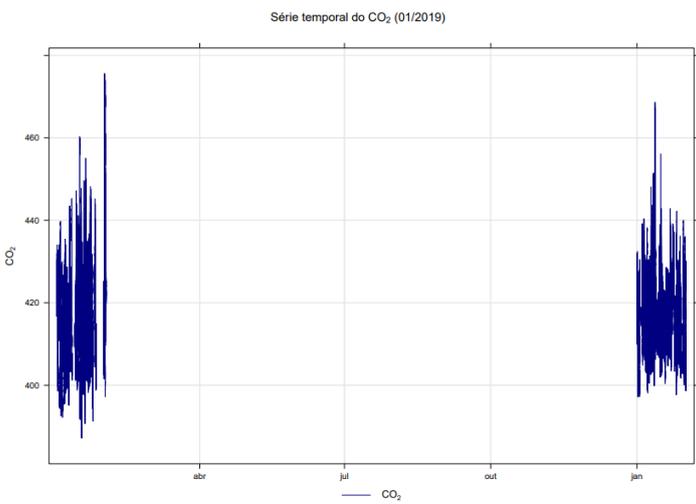
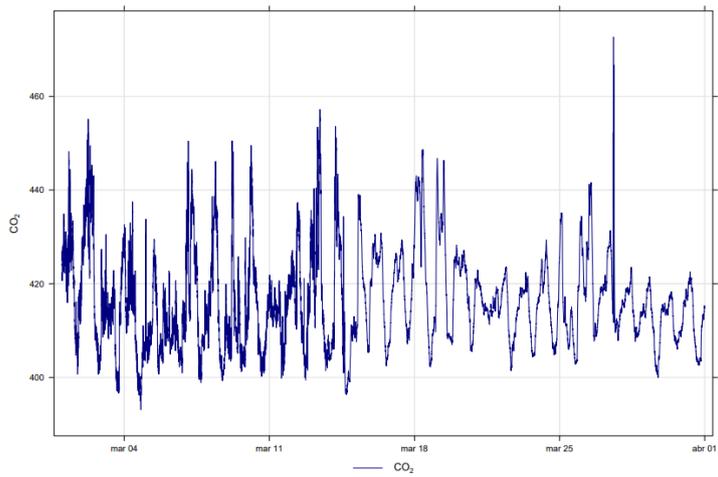


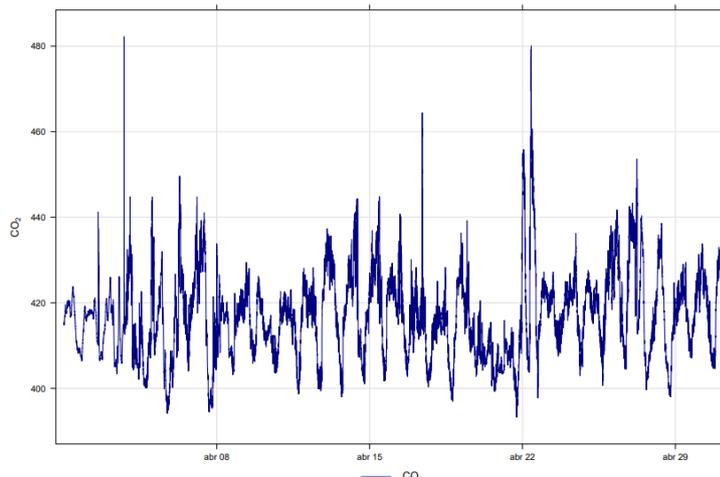
Figura 61 - Variação mensal das concentrações de CO<sub>2</sub> medidas no sítio do Pico do Jaraguá no ano de 2017



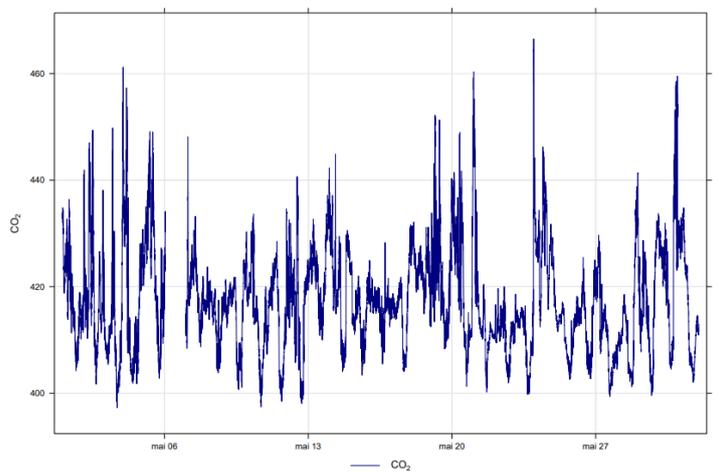
Série temporal do CO<sub>2</sub> (03/2019)



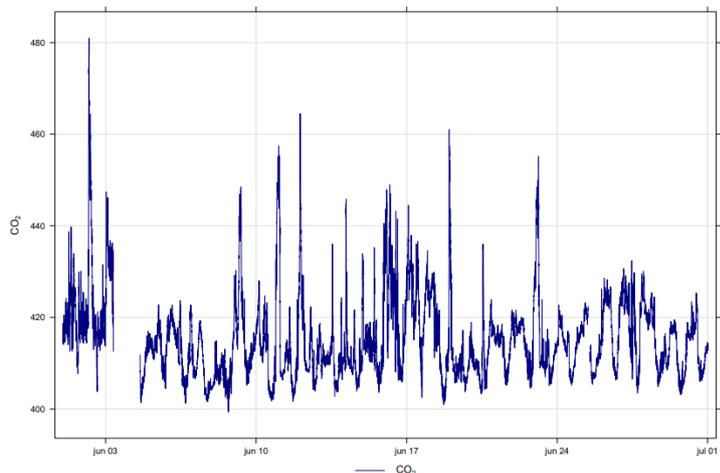
Série temporal do CO<sub>2</sub> (04/2019)



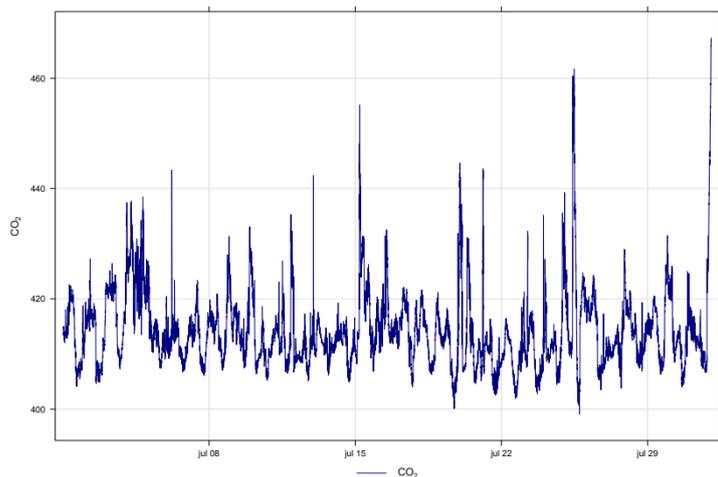
Série temporal do CO<sub>2</sub> (05/2019)



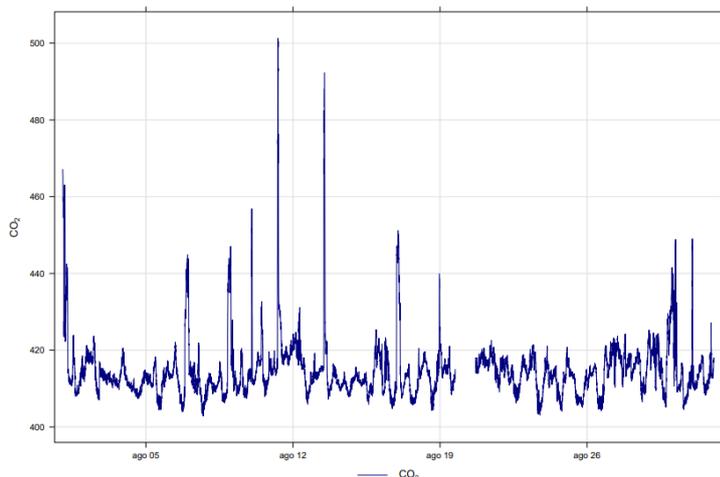
Série temporal do CO<sub>2</sub> (06/2019)



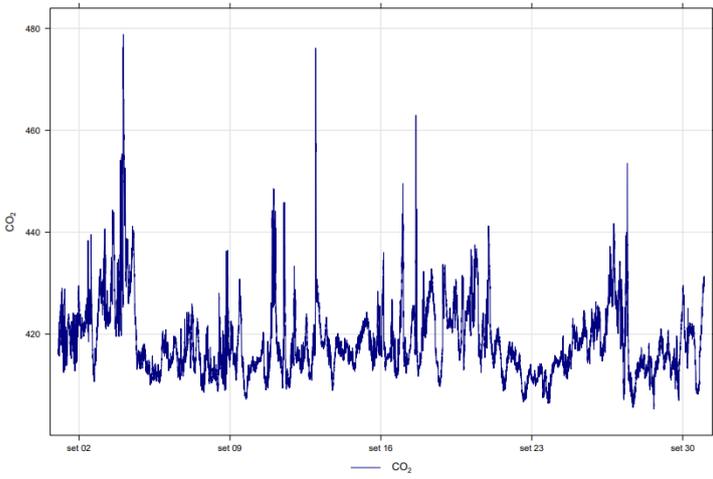
Série temporal do CO<sub>2</sub> (07/2019)



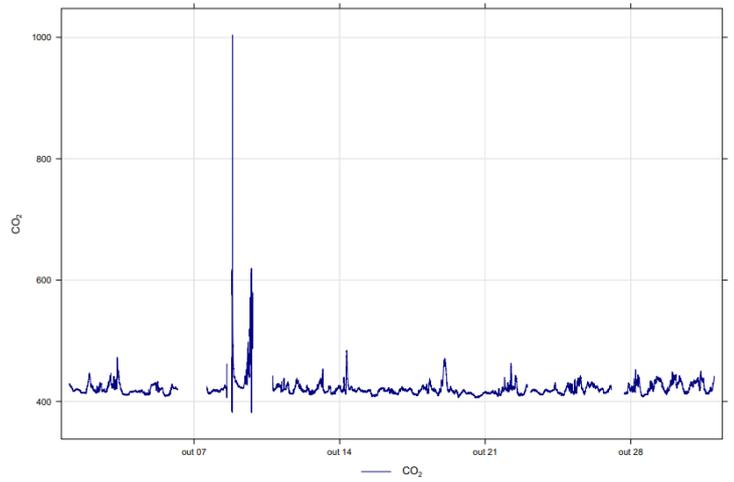
Série temporal do CO<sub>2</sub> (08/2019)



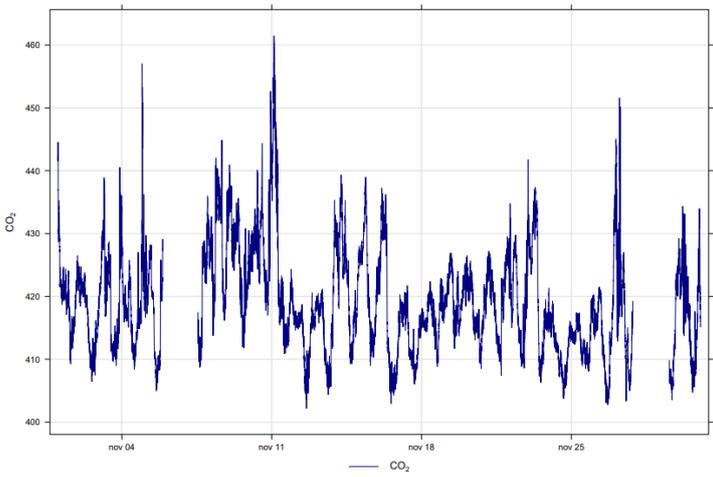
Série temporal do CO<sub>2</sub> (09/2019)



Série temporal do CO<sub>2</sub> (10/2019)



Série temporal do CO<sub>2</sub> (11/2019)



Série temporal do CO<sub>2</sub> (12/2019)

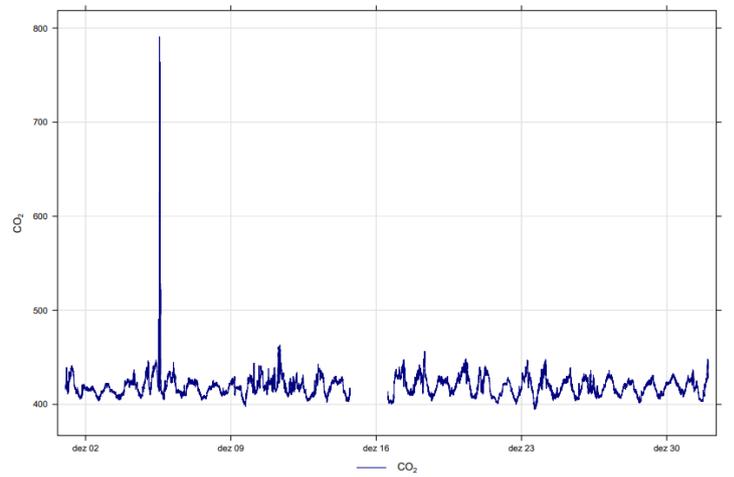


Figura 62 - Variação mensal das concentrações de CO<sub>2</sub> medidas no sitio do Pico do Jaraguá no ano de 2019