

Universidade de São Paulo
Instituto de Física

Determinação das concentrações de metano e dióxido de carbono por sensoriamento remoto na Amazônia e comparação com observações em superfície

Itiara Mayra Barbosa de Albuquerque

Orientador(a): *Prof. Dr. Paulo Eduardo Artaxo Netto*

Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Física da Universidade de São Paulo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Eduardo Artaxo Netto (IF-USP)

Profa. Dra. Evlyn Marcia Leao de Moraes Novo (INPE)

Profa. Dra. Rita Yuri Ynoue (IAG-USP)



São Paulo
2022

FICHA CATALOGRÁFICA
Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Albuquerque, Itiara Mayra Barbosa de

Determinação das concentrações de metano e dióxido de carbono por sensoriamento remoto na Amazônia e comparação com observações em superfície. São Paulo, 2022.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. Instituto de Física. Depto. de Física Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Eduardo Artaxo Netto

Área de Concentração: Física.

Unitermos: 1. XCO₂; 2. XCH₄; 3. Sensoriamento remoto; 4. floresta Amazônica; 5. Validação.

USP/IF/SBI-80/2022

University of São Paulo
Physics Institute

**Methane and carbon dioxide concentrations
measured using remote sensing in Amazonia and
comparison with ground-based measurements**

Itiara Mayra Barbosa de Albuquerque

Supervisor: *Prof. Dr. Paulo Eduardo Artaxo Netto*

Dissertation submitted to the Physics Institute of the
University of São Paulo in partial fulfillment of the
requirements for the degree of Master of Science.

Examining Committee:

Prof. Dr. Paulo Eduardo Artaxo Netto (IF-USP)

Profa. Dra. Evlyn Marcia Leao de Moraes Novo (INPE)

Profa. Dra. Rita Yuri Ynoue (IAG-USP)

São Paulo
2022

Agradecimentos

Agradeço a Deus que em primeiro lugar me trouxe até aqui e nunca me deixou sozinha, fosse me fazendo sentir dentro do meu coração ou através de pessoas queridas que mesmo a mais de 2000 km de distância me animaram com palavras e ações concretas.

Agradeço ao meu orientador prof. Dr. Paulo Artaxo por ter me dado a oportunidade de integrar o Laboratório de Física Atmosférica (LFA) e trabalhar no projeto Emissão de gases de efeito estufa na Amazônia e sistema de análise de dados e serviços no *Research Centre for Greenhouse Gas Innovation* (RCGI), apoiados pela SHELL e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), podendo conhecer pessoas de diferentes institutos e perspectivas na abordagem dos problemas científicos. Agradeço também aos alunos e professores do Laboratório de Física Atmosférica, pelo apoio e ajuda em várias etapas deste trabalho.

Com todo o meu coração eu agradeço ao Vinicius Cordeiro por ser meu companheiro em todas as minhas aventuras e me apoiar incondicionalmente.

A todos os meus amigos-família do Movimento dos Focolares que terão sempre a minha gratidão por serem uma base firme para mim onde quer que eu vá.

Agradeço a equipe do *Soapbox Science* Maceió nas pessoas da profa. Dra. Fernanda Matias Serlingardi e de Michele Beroldo Coêlho, e a Sedy Melissa do Nascimento pela amizade e por serem fonte de inspiração e força para mim.

Ao meu pai e irmãos, que a seu modo torcem por mim.

Agradeço a USP por me permitir fazer parte da sua comunidade, e ao Dojô do CEPE-USP que foram casa e me deram senso de pertencimento em meio a tantas mudanças.

Agradeço ao Instituto de Física da USP (IFUSP) e todos os seus servidores. E aos professores Vito Vanin e Medina que através da monitoria das disciplinas de Fundamentos de Mecânica e de Mecânica me ensinaram que o ensino de Física pode ser feito com qualidade, respeito e compreensão.

Agradeço a FAPESP e a Shell pelo financiamento do projeto Emissão de gases de efeito estufa na Amazônia e sistema de análise de dados e serviços.

Agradeço à CAPES pela bolsa de estudos 88887.595792/2020-00 e ao RCGI e FUSP pelo período de serviços prestados.

*“La scienza un giorno finirà,
ma l’amore mai tramonterà.”*

Gen Verde, *Corriamo Insieme* (1975)

Resumo

Com o aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) atmosféricos nas últimas décadas e seus impactos no clima terrestre, monitorar, conhecer suas fontes e sumidouros e como eles participam do ciclo do carbono tem se tornado uma tarefa cada vez mais importante. Nesse contexto, a floresta Amazônica desempenha um papel fundamental na ciclagem de carbono por meio do dióxido de carbono (CO₂) e das emissões de metano (CH₄). A floresta armazena em seu ecossistema cerca de 120 PgC, e a absorção pela fotossíntese representa 16% da absorção total terrestre. A Bacia Amazônica, com seus mais de 6 milhões de km², dos quais 20% são inundados sazonalmente, contribui significativamente para as emissões de metano, com cerca de $3,8 \pm 10,9$ Tg CH₄ por ano, o que representa 30% das emissões totais de metano por planícies alagadas. Entretanto, o desmatamento e degradação florestal podem estar alterando o poder de absorção de carbono pela floresta com a perda de biomassa da floresta para a atmosfera, levando a floresta a se tornar fonte de carbono em algumas regiões ou neutra na absorção de carbono em outras. Medir as concentrações de GEE sobre a floresta Amazônica é tão importante quanto desafiador, já que as medidas terrestres são difíceis e escassas. Assim, as concentrações de GEE fornecidas por medidas de sensoriamento remoto orbital podem ser uma ferramenta importante, pois fornecem cobertura global da superfície terrestre continuamente com alta resolução temporal e espacial. Este trabalho utilizou produtos XCO₂ e XCH₄ determinados pelos sensores dos satélites *Orbiting Carbon Observatory 2* (OCO-2), *Greenhouse Gases Observing Satellite* (GOSAT) e *Tropospheric Monitoring Instrument* (TROPOMI), individualmente e também combinados com o produto MERGED e comparou com medidas em solo de CO₂ e CH₄ realizadas nas torres do Observatório da Torre Alta da Amazônia (ATTO), localizado na Amazônia Central e de CO₂ da torre de fluxo do do experimento LBA no Km 67 em Santarém (K67/SAN) no estado do Pará, ambos em reservas florestais. Os bias e erros calculados entre as concentrações dos produtos de sensoriamento remoto com as de superfície no sítio ATTO representam menos de 1% da concentração atmosférica média global de CO₂ e de 1% e erro de 2% com as de superfície de K67/SAN, que com 95% de nível de confiança o valor de *bias* nulo entre as medidas dos produtos do OCO-2, GOSAT e MERGED e as de superfície no sítio ATTO, bem como entre as medidas dos produtos do OCO-2 e do MERGED com as de superfície em K67/SAN esteve no intervalo de confiança do bias. Para CH₄ as concentrações dos sensores foram subestimadas em relação as concentrações de superfície em que os bias e erros calculados foram entre 2% e 3% da concentração global de CH₄ na atmosfera. Portanto, os resultados obtidos demonstraram que a obtenção de medidas de boa qualidade para regiões de baixo albedo de superfície e alta concentração de nuvens, como a floresta Amazônica, ainda é um desafio para os sensores e algoritmos dos modelos de inversão, tendo em vista o número reduzido de medidas ao longo de quase uma década, como para o GOSAT. Porém, mesmo com essas limitações os valores de bias e erro calculados na validação demonstram que eles são adequados para monitorar concentrações de CO₂ e CH₄ regionais sobre a floresta Amazônica.

Palavras Chaves: XCO₂; XCH₄; sensoriamento remoto; Floresta Amazônica; validação.

Abstract

With the increasing concentration of atmospheric greenhouse gases (GHG) in the last decades and their impacts on the terrestrial climate, monitoring, knowing their sources and sinks and how they participate in the carbon cycle has become an increasingly important task. In this context, the Amazon Forest plays a fundamental role in carbon cycling through carbon dioxide (CO₂) and methane emissions (CH₄). The forest stores in its ecosystem about 120 PgC, and uptake by photosynthesis accounts for 16% of total terrestrial uptake. The Amazon Basin, with its more than 6 million km², of which 20% is seasonally flooded, contributes significantly to CH₄ emissions, with about 3.8 ± 10.9 Tg CH₄ per year, which represents 30% of total methane emissions by floodplains. However, deforestation and forest degradation may be altering the carbon uptake power of the forest with the loss of forest biomass to the atmosphere, leading the forest to become a carbon source in some regions or carbon uptake neutral in others. However, measuring GHG concentrations over the Amazon rainforest is both important and challenging, as terrestrial measurements are difficult and scarce. Thus, GHG concentrations provided by remotely sensed satellite measurements can be an important tool, as they provide global coverage of the Earth's surface continuously with high temporal and spatial resolution. This work used XCO₂ and XCH₄ products determined by sensors from the (Orbiting Carbon Observatory 2) OCO-2, Greenhouse Gas Observing Satellite (GOSAT) and Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) satellites, individually and also combined with the MERGED product and compared with ground measurements of CO₂ and CH₄ made at the Amazon Tall Tower Observatory (ATTO), located in Central Amazonia and of CO₂ from the Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA) flow tower at K67 in Santarem (K67/SAN) in Pará state, both in forest reserves. The calculated biases and errors between the concentrations of the remote sensing products with those at the ATTO site represent less than 1% of the global mean atmospheric CO₂ concentration and 1% and 2% error with those at the K67/SAN surface site, that at 95% confidence level, the null bias value between the OCO-2, GOSAT and MERGED product measurements and the surface measurements at the ATTO site, and between the OCO-2 and MERGED product measurements and the surface measurements at K67/SAN was in the bias confidence interval. For CH₄ the sensor concentrations were underestimated relative to the surface concentrations where the calculated biases and errors were between 2% and 3% of the overall CH₄ concentration in the atmosphere. Therefore, the results obtained demonstrated that obtaining good quality measurements for regions of low surface albedo and high cloud concentration, such as the Amazon rainforest, is still a challenge for the sensors and inversion model algorithms, given the small number of measurements over almost a decade, as for GOSAT. However, despite these limitations the bias and error values calculated in the validation show that they are suitable for monitoring regional CO₂ and CH₄ concentrations over the Amazon Forest.

Keywords:

XCO₂; XCH₄; remote sensing; Amazon Forest; validation;

Lista de Figuras

1.1	Espectro de irradiância solar simulado no topo da atmosfera em amarelo e na superfície terrestre em laranja. Os comprimentos de onda da irradiância solar compreendem as regiões do espectro ultravioleta até o comprimento de onda do infravermelho de ondas curtas (SWIR), como mostram as setas horizontais. Os constituintes atmosféricos O ₃ , vapor d'água, O ₂ , CO ₂ e CH ₄ aparecem na imagem em suas respectivas regiões de absorção. Adaptado de: (NASA Solar Irradiance, 2022)	2
1.2	Concentração média mensal de CO ₂ (esquerda) e concentração média mensal global de CH ₄ (direita), ambos em vermelho e em preto o mesmo após a correção da sazonalidade, medidos na estação de monitoramento da <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> em Mauna Loa no Havaí. Adaptado de: (Scripps CO2 Program, 2022).	3
1.3	Esquema do ciclo global do carbono que apresenta a quantidade de carbono estocada nos reservatórios e a quantidade de carbono presente nos fluxos entre esses reservatórios em GtC. Adaptado de: Friedlingstein et al. (2022)	4
1.4	Fluxos de metano entre 2008-2017 em Tg CH ₄ ano ⁻¹ a partir de estimativas <i>top-down</i> e <i>bottom-up</i> de fontes naturais e antropogênicas, bem como de remoção por meio do radical OH ⁻ . Adaptado de: Saunio et al. (2020)	6
3.1	Mapa da região Amazônica com a localização do Observatório da Torre Alta da Floresta (ATTO) marcado em roxo e das torres de fluxos do experimento LBA, representadas em laranja, incluindo a do Km 67 em Santarém. Adaptado de: Chambers et al. (2021); Andreae et al. (2015); Paca et al. (2022)	13
3.2	Conjuntos de trajetórias reversas (<i>back trajectories</i>) mostrando o percurso a partir de direção ENE de 1 a 31 de março de 2014 à esquerda e de ESE à direita de 1 a 30 de setembro de 2014, característico das condições das estações chuvosa e seca, respectivamente. Adaptado de: Pöhlker et al. (2019)	14
3.3	Região de influência para Santarém com relação às trajetórias da massa de ar que chegam ao sítio. Adaptado de: Gatti et al. (2021)	14
3.4	Séries temporais da altura da coluna de vapor d'água à esquerda e variação anual do tamanho da coluna de vapor d'água à direita a partir de medidas da rede AERONET para ATTO (topo) e Rio Branco (base).	15

3.5	Precipitação mensal para o sítio ATTO entre os anos de 2012 e 2014 e dados de precipitação medidos pelo INMET em Manaus entre 1961 e 1990 utilizados como referência na comparação com as medidas no ATTO. Adaptado de: Andreae et al. (2015)	16
3.6	Variação anual com médias de 16 dias para (a) precipitação (Precip; mm mês ⁻¹ ; barras em cinza), temperatura do ar (T_{ar} ; °C) e (b) fluxo de radiação de comprimento de onda curto incidente (SW_{down} ; W m ⁻²) e radiação de onda longa (LW_{down} ; W m ⁻²) para 4 locais na Amazônia, incluindo o sítio K67/SAN (K67). Adaptado de: Restrepo-Coupe et al. (2021)	17
3.7	Ciclo diário da altura da CLP durante os períodos entre 15 de fevereiro e 31 de março de 2014 (a) e 1 de setembro e 15 de outubro de 2014 (b). As linhas verticais representam o horário nascer do sol em horário local (06:00), pôr do sol (18:00) (linha cheia) e da erosão CLN (linha tracejada). Adaptado de: Carneiro and Fisch (2020)	17
3.8	Locais na Amazônia em que são realizadas medidas de micrometeorologia e fluxos de carbono em torres. Adaptado de: Chambers et al. (2021)	19
3.9	Perfis verticais de CH ₄ para Rio Branco e Salinópolis na Amazônia obtidos a partir de medidas utilizando aviões. Adaptado de: Webb et al. (2016).	19
3.10	Perfis verticais médios anuais de CO ₂ , com valores de <i>background</i> subtraídos para cada local analisado por Gatti et al. (2021) entre 2010 e 2018, em que o valor médio considerando todos os anos está representado em preto. Adaptado de: Gatti et al. (2021).	20
3.11	Equipamento PICARRO à esquerda e intensidade da luz em função do tempo em um sistema de espectroscopia de <i>ring-down</i> de cavidade com e sem uma amostra. Adaptado de: Picarro (2022).	21
3.12	Ilustração do equipamento Licor-6262 à esquerda e seu esquema de funcionamento à direita. Adaptado de: LI-COR, Inc (1996).	22
3.13	Fluxograma representando as etapas da inversão para a obtenção do produto de nível 2. Adaptado de: O'Dell et al. (2012).	23
3.14	Imagens dos sensores TANSO e CAI presentes em órbita no satélite GOSAT. JAXA Mission & Instrument (2009).	25
3.15	Ilustração com a representação do sensor OCO-2 e informações sobre as medidas desse instrumento. Adaptado de: JAXA Mission & Instrument (2009).	26
3.16	Ilustração representando o sensor TROPOMI a bordo do satélite Sentinel-5P e as variáveis monitoradas por ele do espaço. KNMI (2021).	27
4.1	Volume médio mensal de precipitação em milímetros para o sítio ATTO, variando entre 300 mm em março e 47 mm em agosto, aproximadamente.	34

4.2	Fluxo radiativo incidente médio mensal em W/m^2 para o sítio ATTO, variando aproximadamente entre $165 W/m^2$ em março e $250 W/m^2$ em setembro.	35
4.3	Perfil vertical de CO_2 e CH_4 ao longo dos 5 níveis da torre de 80 m no sítio ATTO, durante todas as horas do dia. À esquerda estão os perfis de CO_2 e à direita os de CH_4 . O perfil vertical em azul representa as concentrações durante a estação chuvosa, em vermelho apenas durante a estação seca e o em preto é o completo com todos os meses do ano.	36
4.4	Perfil vertical de CO_2 e CH_4 ao longo dos 5 níveis da torre de 80 m no sítio ATTO entre 13:00 e 16:00. À esquerda estão os perfis de CO_2 e à direita os de CH_4 . O perfil vertical em azul representa as concentrações durante a estação chuvosa, em vermelho apenas durante a estação seca e o em preto é o completo com todos os meses do ano.	36
4.5	Concentração média mensal de CO_2 no sítio ATTO para o intervalo de 2012-2021. A reta tracejada representa o melhor ajuste linear médio para os valores mensais. As cruces e os triângulos pretos representam as médias das estações secas (S) e chuvosas (C), que estão demarcadas pelas áreas em cinza.	37
4.6	Concentração média mensal de CO_2 no sítio ATTO para o intervalo de 2012-2021 dessazonalizada. As cruces e os triângulos pretos representam as médias das estações secas (S) e chuvosas (C), respectivamente, que estão demarcadas pelas áreas em cinza.	38
4.7	Ciclo diurno do CO_2 no sítio ATTO. As linhas representam as médias horárias entre os anos de 2012 e 2020 para as estações secas e chuvosas. As áreas cinzas marcam o período da noite no local, enquanto a área verde marca o horário de passagem do satélite.	38
4.8	Concentração média mensal de CH_4 no sítio ATTO para o intervalo de 2012-2021. A reta tracejada representa o melhor ajuste linear médio para os valores mensais. As cruces e os triângulos pretos representam as médias das estações secas (S) e chuvosas (C), que estão demarcadas pelas áreas em cinza.	39
4.9	Concentração média mensal de CH_4 no sítio ATTO para o intervalo de 2012-2021 dessazonalizada. As cruces e os triângulos pretos representam as médias das estações secas (S) e chuvosas (C), respectivamente, que estão demarcadas pelas áreas em cinza.	40
4.10	Ciclo diurno de CH_4 no sítio ATTO. As linhas representam as médias horárias entre os anos de 2012 e 2020 para as estações secas e chuvosas. As áreas cinzas marcam o período da noite no local, enquanto a área verde marca o horário de passagem do satélite.	40

4.11	Volume médio mensal de precipitação em milímetros para Santarém, variando entre 160 mm em abril e 25 mm em setembro, aproximadamente. . .	41
4.12	Fluxo radiativo incidente médio mensal em W/m^2 para Santarém, variando entre $160 W/m^2$ em março e $240 W/m^2$ em setembro, aproximadamente. .	41
4.13	Perfil vertical de CO_2 dos 8 níveis da torre de fluxo K67 em Santarém, durante todas as horas do dia à esquerda e entre as 13:00 e 16:00, no horário local, à direita. O perfil vertical em azul representa as concentrações durante a estação chuvosa, em vermelho apenas durante a estação seca e o em preto é o completo com todos os meses do ano. O perfil vertical em azul representa as concentrações durante a estação chuvosa, em vermelho apenas durante a estação seca e o em preto é o completo com todos os meses do ano.	42
4.14	Concentração média mensal de CO_2 em Santarém para o intervalo de 2002-2019. A reta tracejada representa o melhor ajuste linear para os valores mensais. As cruces e os triângulos pretos representam as médias das estações secas (S) e chuvosas (C), que estão demarcadas pelas áreas em cinza.	43
4.15	Concentração média mensal de CO_2 em Santarém para o intervalo de 2002-2019 dessazonalizada. As cruces e os triângulos pretos representam as médias das estações secas (S) e chuvosas (C), respectivamente, que estão demarcadas pelas áreas em cinza.	43
4.16	Ciclo diurno do CO_2 no sítio K67/SAN. As linhas representam as médias horárias entre os anos de 2002 e 2019 para as estações secas e chuvosas. As áreas cinzas marcam o período da noite no local, enquanto a área verde marca o horário de passagem do satélite.	44
4.17	Correlograma com os coeficientes de correlação obtidos entre as medidas de superfície e dos produtos de satélite colocalizados em diferentes raios em torno da posição da medida de superfície. O correlograma entre as medidas do OCO-2 e as de superfície no sítio ATTO está representado em verde, o correlograma entre o GOSAT de XCO_2 e as medidas no sítio ATTO estão em vermelho, e o entre o produto MERGED de XCO_2 e as medidas de superfície em azul. Os círculos marcam os raios de influência determinados para cada um dos produtos.	45

4.18	Correlograma com os coeficientes de correlação obtidos entre as medidas de superfície e dos produtos de satélite colocalizados em diferentes raios em torno da posição da medida de superfície. O correlograma entre as medidas do TROPOMI e as de superfície no sítio ATTO está representado em verde, o correlograma entre o GOSAT de XCH ₄ e as medidas no sítio ATTO estão em vermelho, e o entre o produto MERGED de XCH ₄ e as medidas de superfície em azul. Os círculos marcam os raios de influência determinados para cada um dos produtos.	46
4.19	Correlograma com os coeficientes de correlação obtidos entre as medidas de superfície e dos produtos de satélite colocalizados em diferentes raios em torno da posição da medida de superfície. O correlograma entre as medidas do OCO-2 e as de superfície em Santarém está representado em verde, o correlograma entre o GOSAT de XCO ₂ e as medidas de superfície em Santarém está em vermelho, e o entre o produto MERGED de XCO ₂ e as medidas de superfície em azul. Os círculos marcam os raios de influência determinados para cada um dos produtos.	47
4.20	Concentrações médias de CO ₂ no sítio ATTO entre 2012-2020 em vermelho comparadas com medidas dos produtos OCO-2, GOSAT, MERGED e CAMS de XCO ₂ dentro do raio de influência de 270 km em torno da torre. As áreas em cinza marcam as estações seca (S) e chuvosa (C).	49
4.21	Concentrações médias de CO ₂ em K67/SAN entre 2002-2019 em vermelho comparadas com medidas dos produtos OCO-2, GOSAT, MERGED e CAMS de XCO ₂ dentro do raio de influência 170 km em torno da torre. As áreas em cinza marcam as estações seca (S) e chuvosa (C).	50
4.22	Concentrações médias de CH ₄ no sítio ATTO entre 2012-2020 em vermelho comparadas com medidas dos produtos TROPOMI, GOSAT, MERGED e CAMS de XCH ₄ dentro do raio de influência em torno da posição da medida de superfície de 270 km. As áreas em cinza marcam as estações seca (S) e chuvosa (C).	52

Lista de abreviaturas e siglas

ACOS	<i>Atmospheric CO2 Observation from Space</i>
AERONET	<i>Aerosol RObotic NETwork</i>
AIRS	<i>Atmospheric Infrared Sounder</i>
ATTO	Observatório da Torre Alta da Amazônia
CAI	<i>Cloud and Aerosol Imager</i>
CH₄	Metano
CLC	Camada limite convectiva
CLP	Camada limite noturna
CLP	Camada limite planetária
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Dióxido de carbono
EE	Efeito estufa
EMMA	<i>Ensemble Median Algorithm</i>
ENVISAT	<i>Environmental Satellite</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
FTS	<i>Fourier Transform Spectrometer</i>
GEE	Gases de efeito estufa
GeoCarb	<i>Geostationary Carbon Cycle Observatory</i>
GOSAT	<i>Greenhouse Gases Observing Satellite</i>
HCHO	Formaldeído
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IR	Infravermelho

JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
LBA	<i>Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia</i>
N₂	Nitrogênio
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NIES	<i>National Institute for Environmental Studies</i>
O₃	Ozônio
OCO-2	<i>Orbiting Carbon Observatory 2</i>
OH⁻	Radical hidroxila
RDSU	Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã
RMSE	Erro médio quadrático
SCIAMACHY	<i>SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY</i>
SO₂	Dióxido de enxofre
SWIR	Comprimentos de onda do infravermelho de ondas curta
TANSO	<i>Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observation</i>
TCCON	<i>Total Carbon Column Observing Network</i>
TIR	Infravermelho térmico
TROPOMI	<i>TROpospheric Monitoring Instrument</i>
VIIRS	<i>Visible Infrared Imaging Radiometer Suite</i>
XCH₄	Concentração média de CH ₄ ao longo da coluna atmosférica
XCO₂	Concentração média de CO ₂ ao longo da coluna atmosférica
ZCIT	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

Índice

Lista de Figuras	vii
Lista de Abreviaturas e Siglas	xii
1 Introdução	1
1.1 Interações biosfera-atmosfera: composição físico-química da atmosfera e o clima terrestre	1
1.2 O ciclo do carbono global e na Amazônia	3
1.2.1 O ciclo do carbono	3
1.2.2 O ciclo do metano	5
1.3 Ciclos do carbono e metano na Amazônia	6
1.4 Comparações entre medidas de CO ₂ e CH ₄ de sensores a bordo de satélites e medidas de superfície	7
2 Objetivos	11
3 Metodologia	12
3.1 Definição das áreas de estudo	12
3.2 Aspectos meteorológicos das áreas de estudo	15
3.3 Monitoramento de gases de efeito estufa	18
3.3.1 Medidas de CO ₂ e CH ₄ em superfície na Amazônia	18
3.3.2 Instrumentação envolvida na obtenção de medidas de CO ₂ e CH ₄ em superfície	20
3.3.3 Medidas de XCO ₂ e XCH ₄ por sensoriamento remoto de satélites	22
3.3.4 Instrumentação envolvida na obtenção de medidas de XCO ₂ e XCH ₄ por sensoriamento remoto de satélites	25
3.4 Aquisição dos produtos de XCO ₂ e XCH ₄ de sensoriamento remoto de satélites e sua disponibilização	29
3.5 A questão da colocação espaço-temporal das medidas de sensores de satélite	30
3.6 Cálculo de bias e erro médio quadrático da comparação	30
3.6.1 Cálculo do bias	31
3.6.2 Erro médio quadrático	31
4 Resultados e Discussões	33
4.1 Resultados para o sítio ATTO	33

4.1.1	Aspectos meteorológicos e concentração atmosférica de CO ₂ e CH ₄ para o sítio ATTO	33
4.1.2	Concentrações de CO ₂ e CH ₄ para o sítio ATTO	35
4.2	Resultados em K67/SAN	40
4.2.1	Aspectos meteorológicos e concentração atmosférica de CO ₂ e CH ₄ em K67/SAN	40
4.2.2	Concentrações de CO ₂ para o sítio K67/SAN	42
4.3	Critério de colocação das medidas de superfície e dos dados de sensoriamento remoto	44
4.4	Resultados da validação	47
4.4.1	Comparação entre medidas de produtos de XCO ₂ e XCH ₄ de satélites e medidas de superfície na Amazônia	47
4.4.1.1	Número de medidas fornecidas pelos produtos de satélite para os sítios ATTO e K67/SAN	47
4.4.1.2	Valores de bias e RMSE entre os produtos de satélite para os sítios ATTO e K67/SAN	48
4.5	Intercomparação entre os produtos de satélites	54
5	Conclusões e Perspectivas Futuras	58
	Referências	61

Capítulo 1

Introdução

1.1 Interações biosfera-atmosfera: composição físico-química da atmosfera e o clima terrestre

A Vida em nosso planeta depende das propriedades e composição da atmosfera, além do clima, que controla os processos críticos de interações entre a biosfera e a atmosfera. A maior parte dos seres vivos depende da composição da atmosfera, que vem sendo alterada pelas atividades antropogênicas.

Assim, para que existisse a atmosfera terrestre como conhecemos hoje, antes foi necessário que a biosfera da Terra passasse por diversas transformações, como por exemplo o surgimento da fotossíntese, que permitiu o acúmulo de oxigênio na atmosfera. Desse modo, a atmosfera que era tolerável apenas para alguns tipos de bactérias, era composta majoritariamente por CO₂, nitrogênio (N₂), vapor d'água, monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂), CH₄ e hidrogênio em menores quantidades, pôde se transformar em um lugar favorável à existência e manutenção de toda a biodiversidade da Terra ([Kasting and Siefert, 2002](#)).

Dessa forma, a atmosfera da Terra como a conhecemos é composta em sua maior parte por N₂ (78,09%) e oxigênio (O₂) (20,95%), totalizando 99% de todas as moléculas presentes na atmosfera, e os demais 1% são formados por gases nobres e pelos chamados gases traços (CO₂, ozônio (O₃), CO, SO₂, CH₄, etc.) ([Jacobson, 2002](#)).

A radiação solar chega à Terra diariamente a uma taxa de 341 W/m², cujo espectro de irradiância está mostrado na Figura 1.1. Parte dessa radiação (30%) é refletida para o espaço pela atmosfera e pela superfície terrestre e cerca de metade da radiação incidente é absorvida pelo continente e pelos oceanos, e por isso o espectro de irradiância solar no topo da atmosfera é diferente do espectro na superfície, como mostra a Figura 1.1 ([Trenberth et al., 2009](#)).

A superfície terrestre aquecida re-irradia essa energia de volta para o espaço em forma de radiação no espectro do infravermelho (IR) ou de comprimento de onda longa, cujo espectro varia de cerca de 730 a 1.000.000 nm ([Mohanakumar, 2008](#); [Maslin, 2014](#)) e como apresentado na Figura 1.1 é similar ao intervalo dos comprimentos de onda de absorção dos gases de efeito estufa, como CO₂, CH₄ e vapor d'água, retendo parte da radiação IR na troposfera. Assim, os gases traços apesar de se apresentarem em concentrações

baixas na atmosfera, interferem diretamente no balanço radiativo terrestre, elevando a temperatura da superfície da Terra como consequência do efeito estufa (EE) natural (Raval and Ramanathan, 1989).

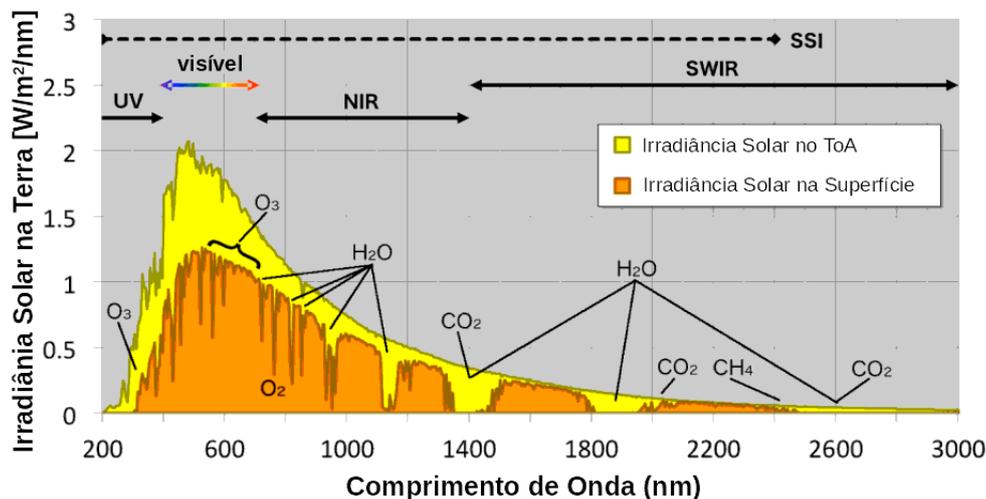


Figura 1.1: Espectro de irradiância solar simulado no topo da atmosfera em amarelo e na superfície terrestre em laranja. Os comprimentos de onda da irradiância solar compreendem as regiões do espectro ultravioleta até o comprimento de onda do infravermelho de ondas curtas (SWIR), como mostram as setas horizontais. Os constituintes atmosféricos O_3 , vapor d'água, O_2 , CO_2 e CH_4 aparecem na imagem em suas respectivas regiões de absorção. Adaptado de: (NASA Solar Irradiance, 2022)

O chamado efeito estufa é um fenômeno natural e na sua ausência, a Terra seria cerca de $35^\circ C$ mais fria, fazendo com que a temperatura média nos trópicos fosse de $-5^\circ C$ (Maslin, 2014). Entretanto, desde o desenvolvimento da agricultura e com a revolução industrial os seres humanos têm contribuído para o aumento da concentração de carbono na atmosfera, como pode ser visto na Figura 1.2. Sabe-se que esse aumento de CO_2 e CH_4 na atmosfera é devido às atividades antropogênicas associadas ao modelo de produção vigente, baseado na queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), e no desmatamento de florestas. O aumento da concentração de gases de efeito estufa é o principal motor da forçante radiativa positiva de $+2,83 W/m^2$, ou seja, de aquecimento, alterando o equilíbrio do balanço radiativo do planeta (Ciais et al., 2013; Myhre et al., 2013).

Os gases CO_2 e CH_4 participam do ciclo do carbono global, mas por terem fontes e sumidouros diferentes e do CO_2 ser mais abundante e ter maior tempo de permanência na atmosfera eles são estudados separadamente neste trabalho. Na próxima seção será apresentado o ciclo do carbono considerando as fontes e sumidouros do CO_2 e as fontes e sumidouros do CH_4 em seção 1.2.1 e como o bioma amazônico se encaixa em ambos os cenários.

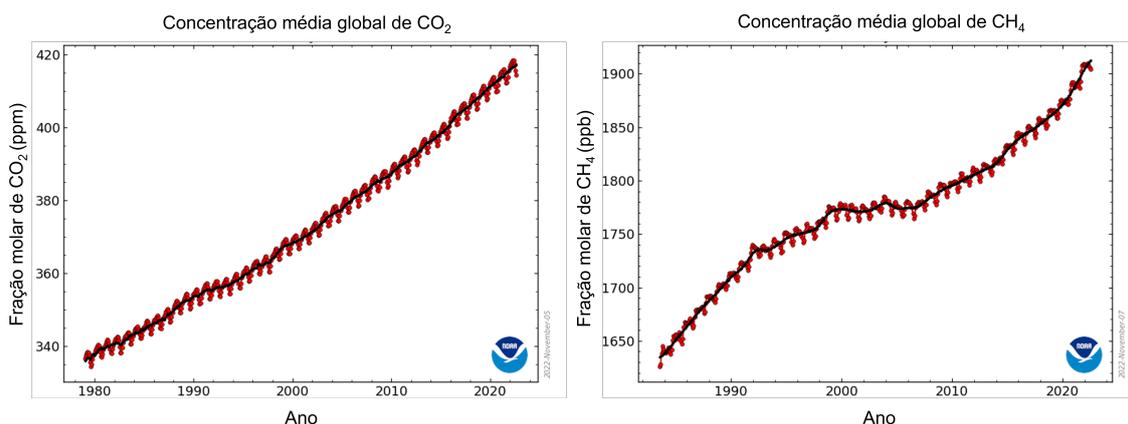


Figura 1.2: Concentração média mensal de CO_2 (esquerda) e concentração média mensal global de CH_4 (direita), ambos em vermelho e em preto o mesmo após a correção da sazonalidade, medidos na estação de monitoramento da *National Oceanic and Atmospheric Administration* em Mauna Loa no Havaí. Adaptado de: ([Scripps CO2 Program, 2022](#)).

1.2 O ciclo do carbono global e na Amazônia

1.2.1 O ciclo do carbono

O ciclo do carbono trata das interações entre seus reservatórios por meio de fluxos de fontes ou sumidouros, que podem ser classificados como lento ou rápido a depender do tempo que o carbono leva para circular de um reservatório para o outro ([Bocanegra \(2022\)](#)). Por exemplo, os reservatórios de domínio lento são aqueles em que o carbono passa mais de 10.000 anos armazenado, com fluxo natural de carbono menor que $0,3 \text{ PgC ano}^{-1}$, como é o caso do carbono estocado em rochas e sedimentos e liberado lentamente por meio da atividade vulcânica e erosão. Dando seguimento ao processo de ciclagem, esse carbono presente nos reservatórios do domínio lento passa a ser distribuído entre os reservatórios de domínio rápido, como os oceanos, a vegetação e a atmosfera. Assim, esses reservatórios realizam trocas de carbono em grandes quantidades e rapidamente na escala temporal ([Ciais et al., 2013](#)).

A Figura 1.3 mostra um esquema do ciclo do carbono global apresentado pelo *global carbon budget* publico em 2022 pelo *Global Carbon Project* ([Friedlingstein et al. \(2022\)](#)). Nesse esquema os círculos representam as quantidades de carbono armazenadas nos reservatórios (oceano, vegetação, solo e atmosfera). As flechas representam a quantidade de carbono transferida de um reservatório para o outro. Assim, as flechas delgadas apresentam o carbono reciclado pela vegetação e pelos oceanos, enquanto as flechas delgadas apresentam os fluxos de carbono devido a atividade antropogênica entre 2012 e 2021. Assim, vemos que os oceanos possuem o maior estoque de carbono com cerca de 40.000 GtC, seguido pela parte continental que estoca cerca de 4.455 GtC em sua vegetação e solo e enfim a atmosfera que estoca cerca de 875 GtC. Como esses três

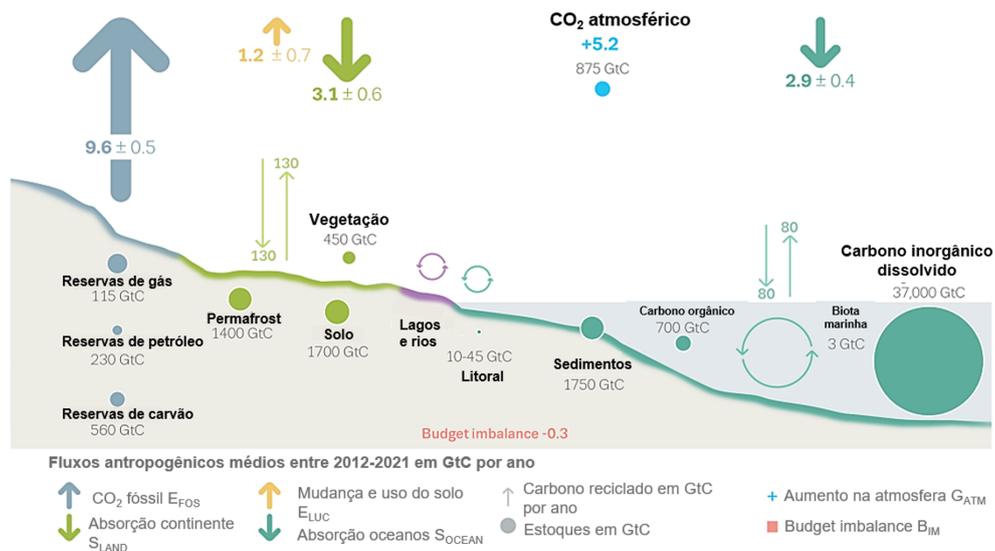


Figura 1.3: Esquema do ciclo global do carbono que apresenta a quantidade de carbono estocada nos reservatórios e a quantidade de carbono presente nos fluxos entre esses reservatórios em GtC. Adaptado de: [Friedlingstein et al. \(2022\)](#)

reservatórios comunicam-se em si, existem trocas de carbono entre o oceano e a atmosfera que ocorrem por meio da diferença de pressão parcial de CO₂ entre eles, além da absorção feita por micro-organismos marinhos como os fitoplanctons que utilizam CO₂ para realizar fotossíntese. As áreas continentais estão conectadas aos oceanos no ciclo do carbono por meio do transporte de carbono que é levado do solo para os lagos e rios e transportado até as áreas costeiras dos oceanos.

A interação entre o as áreas continentais e a atmosfera ocorre por meio da vegetação e de organismos heterotróficos, de modo que a vegetação, como nas florestas, absorve CO₂ durante a fotossíntese e emite através da respiração. Por isso que fora da estação de crescimento no Hemisfério Norte (fim de abril e início de outubro), a taxa de absorção de CO₂ é reduzida, já que os vegetais perdem suas folhas, restando a contribuição da respiração, enquanto que algumas regiões no Hemisfério Sul contribuem com a captura de carbono através da fotossíntese o ano inteiro, como a floresta Amazônica ([Artaxo et al., 2022](#)). Além disso, outras fontes naturais de carbono dos ecossistemas terrestres para a atmosfera são: respiração dos animais, emissões por micro-organismos no solo, a atividade vulcânica, as queimadas por razões naturais além de outras fontes.

Assim, a exploração de combustíveis fósseis e os processos envolvidos com a mudança do uso do solo e a sua degradação, são fontes antropogênicas adicionadas ao ciclo do carbono, implicam mudanças nos estoques de carbono. Segundo [Friedlingstein et al. \(2022\)](#) entre 2011-2020 as emissões antropogênicas foram de $9,6 \pm 0,5 \text{ GtC ano}^{-1}$, dos quais $5,2 \pm 0,02 \text{ GtC ano}^{-1}$ foram acumulados na atmosfera, $3,1 \pm 0,6 \text{ GtC ano}^{-1}$ e $2,9 \pm 0,4 \text{ GtC ano}^{-1}$ foram capturados pelo continente e oceanos, respectivamente, forçando esses reservatórios a armazenarem mais carbono, que no caso da atmosfera tem levado ao

aumento das concentrações, alterando o clima terrestre com o aumento da temperatura global.

1.2.2 O ciclo do metano

O metano é um hidrocarboneto que como gás de efeito estufa tem forte poder de aquecimento global, cerca de 28 vezes maior que o do CO₂, e desde 1750 sua concentração global média na superfície cresceu 156% (Myhre et al. (2013); Szopa et al. (2021)). O mecanismo principal de remoção do metano da atmosfera é através de reações fotoquímicas com o radical hidroxila (OH⁻) (Szopa et al. (2021)), como está representado na Figura 1.4 no ciclo do metano. O radical hidroxila provém de reações fotoquímicas entre o O₃, radiação ultravioleta (UV) e vapor d'água, que consome o metano tendo como resultado dessa reação o produto CH₃, como mostram as Equações 1.1 - 1.3 (Cicerone and Oremland (1988)). Com isso, o tempo de vida do metano na atmosfera é de aproximadamente 10 anos, o que faz das reduções das emissões de metano um importante mecanismo de controle do aquecimento global, pelo seu efeito muito mais rápido do que o do CO₂ (Szopa et al. (2021)).



As emissões antropogênicas de metano representam entre 50% e 65% das emissões globais de metano, predominando sobre emissões naturais segundo estimativas *top-down*. Já as estimativas *bottom-up* avaliam ambas como sendo da mesma magnitude, como pode ser visto em Figura 1.4. Em relação as fontes naturais de metano, as planícies alagadas representam a maior parte da contribuição, emitindo de 177 a 284 Tg(CH₄) ano⁻¹, além de serem as principais responsáveis pela variação interanual das concentrações de metano na atmosfera. Existem ainda outras fontes biogênicas naturais com menor emissão de metano que as planícies alagadas, como o permafrost, os oceanos, animais selvagens e cupins (Ciais et al., 2013).

Entre as fontes antropogênicas de metano estão aquelas associadas ao uso e exploração de combustíveis fósseis, como por exemplo vazamentos em gasodutos de gás natural ou a queima incompleta desses combustíveis fósseis e de biomassa. E sobre as fontes biogênicas associadas à atividade humana estão: a agricultura de arroz, emitindo entre 33 e 40 Tg CH₄ ano⁻¹, a pecuária devido à fermentação entérica dos ruminantes, emitindo entre 7 e 94 Tg CH₄ ano⁻¹, além de emissões por lagos artificiais, tratamento de lixo e queima

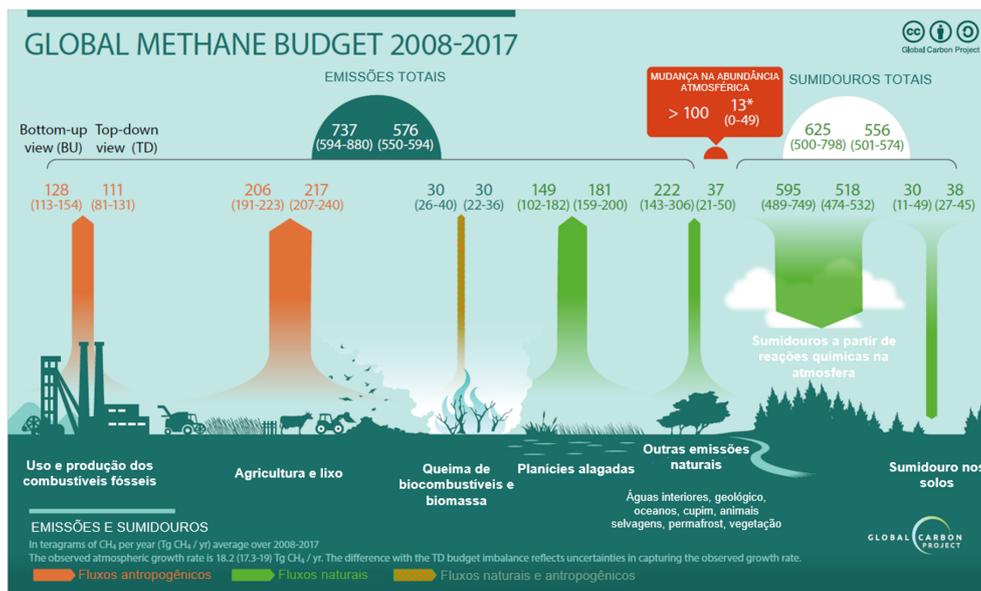


Figura 1.4: Fluxos de metano entre 2008-2017 em Tg CH₄ ano⁻¹ a partir de estimativas *top-down* e *bottom-up* de fontes naturais e antropogênicas, bem como de remoção por meio do radical OH⁻. Adaptado de: [Sauniois et al. \(2020\)](#)

incompleta de biomassa ([Ciais et al., 2013](#)).

1.3 Ciclos do carbono e metano na Amazônia

Dentro dos ciclos do carbono e do metano, a floresta Amazônica desempenha um papel fundamental, já que é a maior floresta tropical do planeta ([Gloor, 2019](#)), armazenando em seu ecossistema - incluindo o solo e a biomassa acima e abaixo da superfície- cerca de 120 PgC ([Malhi et al., 2021](#)).

A vegetação da floresta amazônica ao realizar fotossíntese absorve CO₂ atmosférico a uma taxa de aproximadamente 14 PgC ano⁻¹ e [Beer et al. \(2010\)](#) estimou que essa absorção representa 16% da absorção realizada por toda a vegetação terrestre. Além disso, verificou que a produção primária líquida, ou seja, a quantidade de carbono que é estocada na floresta em forma de folhas, raízes, troncos etc. é cerca de 0,4 Pg C ano⁻¹, já que por meio da respiração da vegetação, de musgos e raízes e da decomposição de matéria orgânica, aproximadamente 13,6 PgC ano⁻¹ são emitidos de volta para a atmosfera.

Ao mesmo tempo que a floresta Amazônica é um importante sumidouro de carbono atmosférico, a principal fonte de emissões de carbono do Brasil é dada pela mudança do uso da terra e florestas com emissões de cerca de 998 milhões de toneladas de CO₂. Em 2020, 78,4% das emissões do setor de mudança e uso da terra e florestas no Brasil foram provenientes do bioma Amazônico ([Potenza et al., 2021](#)). Segundo o ([Mapbiomas, 2021](#)), cerca de 12% da vegetação nativa da Amazônia foi perdida entre 1985 e 2021. Além do desmatamento, outra fonte de carbono associada à exploração da Amazônia é a degradação

florestal, que engloba as seguintes atividades: a fragmentação florestal, efeitos de borda, extração de madeira, incêndios florestais e efeitos de secas. Segundo [Qin et al. \(2021\)](#) essa tem sido a principal maneira pela qual a floresta perde carbono, verificando que entre 2010 e 2019 a degradação pode ter sido responsável pela perda bruta de 3,27 Pg C de biomassa acima do solo, três vezes mais que as perdas causadas pelo desmatamento.

Assim, o aumento da concentração global de carbono atmosférico, juntamente com as perturbações causadas pelo ser humano no ecossistema Amazônico, podem vir a alterar o papel de sumidouro desempenhado pela floresta. [Gatti et al. \(2021\)](#) mostraram que as regiões estudadas a sul e a leste da Amazônia podem estar emitindo mais carbono que absorvem, por estarem mais impactadas pela atividade antropogênica. Enquanto a parte oeste da floresta apresenta um comportamento de emissões neutro ou de sumidouro de carbono. De modo que a emissão média total da Floresta Amazônica foi de $0,29 \pm 0,40$ Pg C ano⁻¹ para o período entre 2010 e 2018.

A bacia Amazônica emitiu cerca de $33,8 \pm 10,9$ Tg CH₄ ano⁻¹, entre 2010 e 2018 contribuindo significativamente com as emissões globais de metano por planícies alagadas, com cerca de 30% das emissões totais de metano por planícies alagadas ([Basso et al., 2021](#)). Existem também áreas que são permanentemente alagadas como os reservatórios de usinas hidroelétricas, que após serem construídos e inundados emitem quantidades expressivas de metano para a atmosfera por causa da decomposição da matéria orgânica submersa, como por exemplo as usinas de Balbina, Curuá-Una, Samuel, e Tucuruí que emitem cerca de 0,4 Tg CH₄ ano⁻¹ ([Malhi et al. \(2021\)](#)).

Por outro lado, o solo da floresta quando bem drenado atua como um sumidouro de metano ([Davidson and Artaxo, 2004](#)). Entretanto, a interferência humana através da transformação do uso do solo tem levado à compactação do solo, reduzindo a sua capacidade de atuar como sumidouro.

Assim, para compreender o ciclo do carbono e avaliar as possíveis mudanças em seus processos ao longo do tempo é preciso monitorar as concentrações de carbono na atmosfera que podem ser medidas de forma direta através de medidas de superfície ou por sensoriamento remoto.

1.4 Comparações entre medidas de CO₂ e CH₄ de sensores a bordo de satélites e medidas de superfície

Com o aumento da concentração de GEE na atmosfera nas últimas décadas e seus impactos no clima terrestre, monitorar e conhecer as suas fontes e sumidouros se tornou cada vez mais importante ([Canadell et al., 2021](#)). Medidas diretas feitas em superfície existem desde 1957 e as medidas de sensoriamento remoto por satélite desde o ano 2002, mas o primeiro satélite inteiramente dedicado ao monitoramento de CO₂ e CH₄ foi lançado

há pouco mais de uma década, que é o GOSAT da *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA), proporcionando informações sobre as concentrações de GEE com alta resolução espacial e temporal (Liang et al., 2017).

Como esses sensores medem radiância e derivam as concentrações médias ao longo da coluna atmosférica por meio de cálculos de transferência radiativa, eles precisam ser calibrados e validados com medidas de superfície. Dessa forma, essa seção se dedica a apresentar alguns trabalhos que buscaram realizar a comparação entre medidas de CO₂ e CH₄ obtidas por sensoriamento remoto, com medidas de superfície da rede *Total Carbon Column Observing Network* (TCCON) que é uma rede de espectrômetros de transformada de Fourier que medem colunas de CO₂, CH₄ e outras moléculas que absorvem no infravermelho, com exatidão e precisão sem precedentes.

As tabelas 1.1 e 1.2 apresentam resultados de bias, desvio padrão e correlação provenientes de outros trabalhos que se dedicaram a validar concentrações de CO₂ e CH₄ estimadas por sensoriamento remoto de satélite comparando com concentrações medidas em superfície.

Tabela 1.1: Resultados de bias, erro e correlação obtidos por diferentes análises de sensores de CO₂.

Autor	Sensor	Bias (ppm)	Desvio (ppm)	Correlação
Cogan et al. (2012)	GOSAT	-0,2	2,26	0,75
Liang et al. (2017) (2009-2016)	GOSAT	-0,41	2,21	0,86
Liang et al. (2017) (2014-2016)	GOSAT	-0,62	2,3	0,67
Kong et al. (2019)	GOSAT	0,24	1,68	0,95
Kong et al. (2019)	OCO-2	0,34	1,57	0,92
Wunch et al. (2017)	OCO-2	0,4	1,5	0,89
Liang et al. (2017)	OCO-2	0,26	1,56	0,93

Na Tabela 1.1 é possível observar que os resultados de bias, erro e correlação obtidos por Cogan et al. (2012), Liang et al. (2017) e Kong et al. (2019) ao compararem medidas de XCO₂ do GOSAT com medidas de superfície da rede TCCON foram menores que 1 ppm. Liang et al. (2017) e Kong et al. (2019) observaram que a qualidade das medidas do GOSAT podem estar diminuindo ao longo dos anos, em que o primeiro chegou a essa conclusão através da observação da diminuição do valor do coeficiente de correlação entre as medidas em 2009 e 2014 e o segundo por ter encontrado um aumento na diferença média entre as medidas do sensor com relação às de superfície com o passar dos anos. Além

disso, tanto [Liang et al. \(2017\)](#) quanto [Cogan et al. \(2012\)](#) relataram dificuldades em obter medidas de concentração média de CO₂ ao longo da coluna atmosférica (XCO₂) sobre a floresta Amazônica. Para [Liang et al. \(2017\)](#) não foi possível reunir medidas de XCO₂ sobre as florestas tropicais, e [Cogan et al. \(2012\)](#) chegou a calcular um desvio padrão de 3,56 ppm, apesar das poucas medidas registradas pelo sensor.

Em [Wunch et al. \(2017\)](#) foi reportada a primeira validação dos produtos de XCO₂ do OCO-2 em que foi encontrado um coeficiente de correlação de 0,86, mediana absoluta do bias menor que 0,4 ppm e erro de 1,5 ppm, que são resultados consistentes também com os encontrados por [Liang et al. \(2017\)](#) e [Kong et al. \(2019\)](#).

Tabela 1.2: Resultados de bias, erro e correlação obtidos por diferentes análises de sensores de CH₄.

Autor	Sensor	Bias (ppb)	Desvio (ppb)	Correlação
Parker et al. (2011)	GOSAT	17,9	13,6	0,38
Parker et al. (2011)	GOSAT	6,17	11,1	0,67
Parker et al. (2011)	GOSAT	4,02	14,7	0,53
Parker et al. (2011)	GOSAT	5,49	13,2	0,58
Parker et al. (2011)	GOSAT	-14,6	7,19	0,70
Parker et al. (2011)	GOSAT	-9,0	15,0	0,03
Hu et al. (2018)	GOSAT	-5,9	13,9	-
Lorente et al. (2021)	TROPOMI	-17	11,5	-
Lorente et al. (2021)	TROPOMI (Corrigido)	-3,4	5,6	-

Medidas de concentração média de CH₄ ao longo da coluna atmosférica (XCH₄) do GOSAT realizadas entre agosto de 2009 e julho de 2010 em diferentes locais foram analisadas por [Parker et al. \(2011\)](#), em que o desvios padrão encontrados variaram de 7 a 15 ppb. O maior ocorreu em Wollongong e que pode estar associado à influência da poluição advinda de Sydney, aumentando os efeitos de espalhamento e comprometendo a qualidade da inversão das concentrações. Além disso, foi verificada uma dependência do valor do bias com a latitude, de modo que os valores absolutos mais baixos estão nas latitudes médias. [Hu et al. \(2018\)](#) também observaram que as medidas de XCH₄ do GOSAT e do TROPOMI possuem dependência com a latitude. O TROPOMI ainda apresentou dificuldades em realizar medidas em regiões com baixo albedo ([Lorente et al., 2021](#)) e alta concentração de vapor d'água ([Hu et al., 2018](#)), que puderam ser identificadas através da comparação entre as medidas do TROPOMI com as do GOSAT que foram subestimadas

em regiões com essas características.

Dessa forma, as medidas de concentrações dos gases de efeito estufa atmosféricos de XCO_2 e XCH_4 apresentam um bom desempenho quando comparados aos valores de superfície e não apresentaram bias e erros significativos, porém não foram encontradas comparações entre medidas radiativas de satélite e de superfície para regiões tropicais como a floresta Amazônica, apenas comparações entre medidas de satélite de XCH_4 e medidas de sensores aerotransportados que coletaram amostras em diferentes altitudes na troposfera em 6 locais diferentes na região Amazônica, em que as diferenças médias entre as concentrações das medidas de sensoriamento remoto do GOSAT e as de avião variaram entre -1,9 e 9,7 ppb e as correlações foram entre 0,6 e 0,91, mostrando que o sensor conseguiu observar a sazonalidade presente nos perfis das medidas de avião.

Capítulo 2

Objetivos

Este trabalho tem como objetivo comparar medidas de GEE (CO_2 e CH_4) por satélites e medidas de superfície na Amazônia. Para isso foram utilizadas medidas em solo realizadas no sítio experimental ATTO e na torre de fluxo K67/SAN e medidas dos sensores OCO-2, TANSO presente no satélite GOSAT, TROPOMI, além de produtos que combinam essas medidas e produtos de modelos. Discutimos as limitações destas medidas, bem como uma detalhada comparação entre elas. Salientamos os seguintes objetivos específicos:

- Compilar medidas da concentração de CO_2 e CH_4 com os sensores GOSAT, OCO-2, TROPOMI, desde o lançamento destas plataformas. Analisar o produto MERGED que combina medidas dos sensores SCIAMACHY, TANSO e OCO-2 para CO_2 e do SCIAMACHY e TANSO para CH_4 . Utilizar as medidas de CO_2 e CH_4 obtidas pelo modelo do *Copernicus Atmosphere Service* (CAMS). Discutir as vantagens e desvantagens de cada sensor e produtos.
- Analisar a série temporal de medidas do sítio ATTO e da torre K67/SAN para CO_2 e do sítio ATTO para CH_4 desde o início de operação das medidas.
- Realizar análises da sazonalidade das concentrações totais na coluna atmosférica dos valores medidos por sensoriamento remoto e medidas de superfície, avaliando as relações entre elas.
- Discutir o papel dos parâmetros meteorológicos na variabilidade das concentrações de CO_2 e CH_4 nos sítios estudados.

Diante da extensão do território ocupado pelo bioma Amazônico, medir e analisar as concentrações de GEE utilizando apenas medidas de superfície por meio de sensores de alta precisão pode não ser viável. Os sensores a bordo de satélites realizam medidas com alta resolução espacial e temporal, mas sofrem com o problema da cobertura de nuvens e dos algoritmos para derivar concentrações a partir da radiâncias. Como medidas dos sensores dos satélites precisam ser comparadas com as condições locais da região analisada, escolhemos comparar medidas de CO_2 e CH_4 sobre a Amazônia com relação as medidas dos sítios experimentais ATTO e K67/SAN.

Capítulo 3

Metodologia

Para avaliar as concentrações de XCO₂ e XCH₄ dos satélites foram utilizadas medidas de superfície realizadas em dois sítios experimentais, no Observatório da Torre Alta da Floresta (ATTO) e no sítio da torre de fluxo K67 em Santarém. As concentrações de CO₂ e CH₄ medidas em superfície foram utilizadas como valores de referência de concentração na comparação com os produtos dos satélites GOSAT, OCO-2, TROPOMI e o MERGED, além da comparação com o produto do modelo CAMS. Nessa seção serão detalhados os parâmetros estatísticos utilizados para a validação das concentrações de XCO₂ e XCH₄, bem como as áreas de estudos serão descritas.

3.1 Definição das áreas de estudo

O sítio experimental ATTO é uma iniciativa germano-brasileira que surgiu a partir da necessidade de observações atmosféricas em torres altas em locais no meio do continente, a fim de documentar as condições atmosféricas e ecológicas do presente e observar as mudanças que podem ocorrer no ecossistema amazônico, causadas pela atividade antropogênica ou mudanças climáticas [Andreae et al. \(2015\)](#).

O ATTO está localizado à cerca de 150 km nordeste de Manaus dentro da Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã (RDSU) na Amazônia Central. Suas atividades começaram em 2012 com medidas atmosféricas, como de CO₂ e CH₄, em torres de 80 m em cinco alturas diferentes 4, 24, 38, 53 e 79 m [Andreae et al. \(2015\)](#). A torre Alta da Floresta de 325 m (torre ATTO) começou a ser construída em 2014 e as medidas de gases traços ainda estão no início, de modo que na validação desenvolvida nesse trabalho foram utilizadas medidas de CO₂ e CH₄ da torre de 80 m.

O sítio da torre de fluxo do Km 67 está localizado na Floresta Nacional do Tapajós a 80 km do sul de Santarém, aproximadamente, no estado do Pará e faz parte do experimento brasileiro *Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia* (LBA) [De Gonçalves et al. \(2013\)](#). Funcionando desde abril de 2001, dentre outros experimentos, o sítio realiza medidas da concentração atmosférica e fluxos de CO₂, mas com interrupções entre 2006 e 2008 e depois entre 2013-2016 causadas por árvores ou atividade elétrica [Hutyra et al. \(2007\)](#); [Paca et al. \(2022\)](#).

O clima da Bacia Amazônica é caracterizado pelos seus períodos de chuva bem

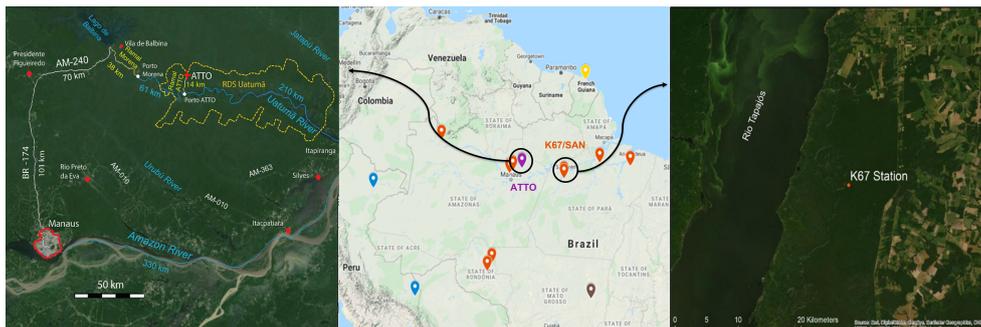


Figura 3.1: Mapa da região Amazônica com a localização do Observatório da Torre Alta da Floresta (ATTO) marcado em roxo e das torres de fluxos do experimento LBA, representadas em laranja, incluindo a do Km 67 em Santarém. Adaptado de: [Chambers et al. \(2021\)](#); [Andreae et al. \(2015\)](#); [Paca et al. \(2022\)](#)

demarcados, classificados como estação chuvosa e seca. O volume de precipitação médio durante o ano na Amazônia Central é de aproximadamente 2300 mm, em que a estação chuvosa entre fevereiro e maio conta com os maiores volumes de chuva, com máximo em março em torno de 330 mm e a estação seca, estimada entre julho e setembro, tem as concentrações mais baixas em setembro < 50 mm ([Andreae et al. \(2015\)](#)). Na região de Santarém, situada na parte ao leste da região Amazônica, a precipitação média anual é de 2074,7 mm (~10% menor que na região central), com estação seca 5 meses entre julho e novembro.

O padrão de precipitação e a direção do vento ao longo do ano na região Amazônica é influenciado pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Durante a estação chuvosa nos primeiros meses do ano, o volume de chuvas é intensificado com a ZCIT. Com a mudança da ZCIT para o Hemisfério Norte o volume de chuvas diminui, sendo formadas principalmente por convecção local. Depois de setembro o volume de precipitação volta a aumentar por causa da ZCAS, levando à formação de um corredor de nuvens que carrega umidade da região Amazônica para o sudeste do Brasil. Na estação chuvosa as massas de ar que chegam aos sítios ATTO e K67/SAN tem a direção ENE e ESE na estação seca, como pode ser visto na Figura 3.2 em que [Pöhlker et al. \(2019\)](#) analisou o percurso das massas de ar até o sítio ATTO, em que K67/SAN também é contemplado, mas a área de influência para Santarém está representada em Figura 3.3 ([Andreae et al., 2015](#); [Botía et al., 2020](#); [Pöhlker et al., 2019](#)).

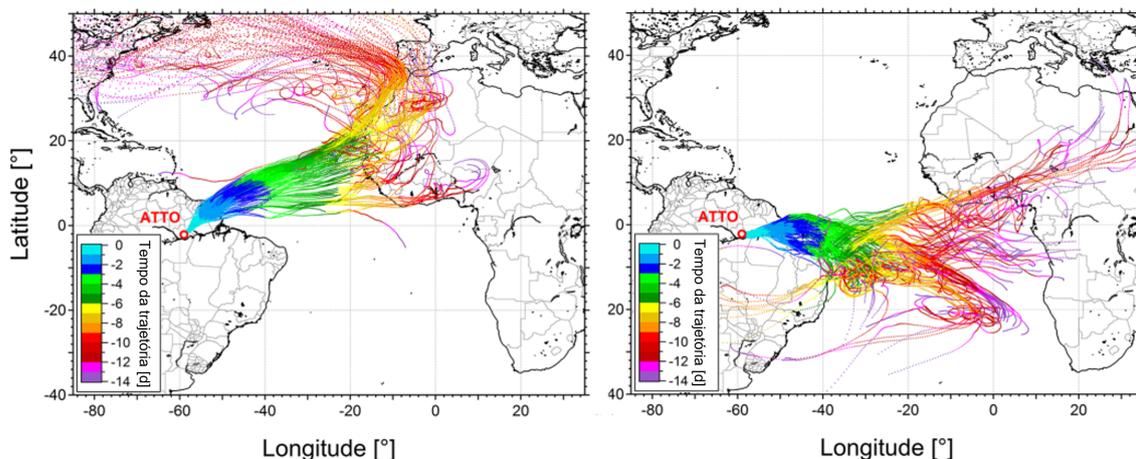


Figura 3.2: Conjuntos de trajetórias reversas (*back trajectories*) mostrando o percurso a partir de direção ENE de 1 a 31 de março de 2014 à esquerda e de ESE à direita de 1 a 30 de setembro de 2014, característico das condições das estações chuvosa e seca, respectivamente. Adaptado de: Pöhlker et al. (2019)

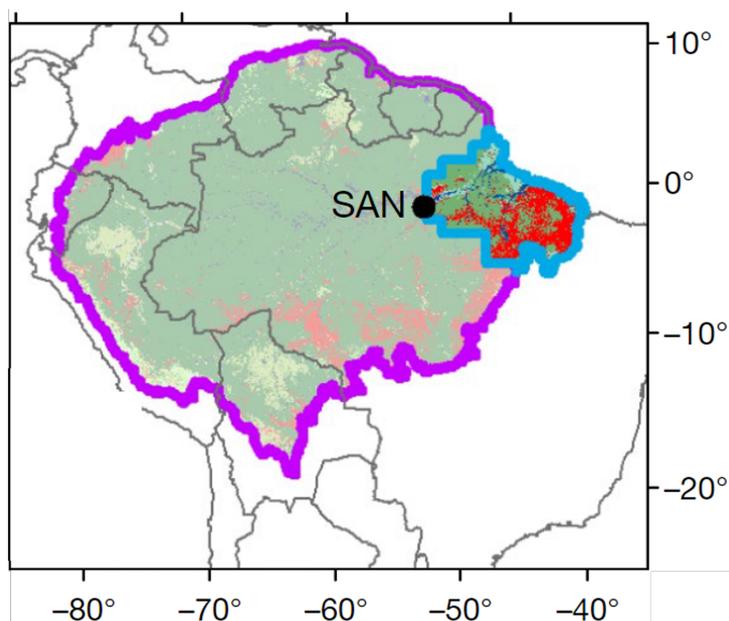


Figura 3.3: Região de influência para Santarém com relação às trajetórias da massa de ar que chegam ao sítio. Adaptado de: Gatti et al. (2021)

A Amazônia é um dos locais mais úmidos do planeta e fonte de vapor d'água para a atmosfera em que a vegetação desempenha um papel fundamental por meio da evapotranspiração. Ao realizar a fotossíntese, as plantas abrem os seus estômatos, que são estruturas presentes na epiderme foliar, para absorver CO_2 e com isso libera água para a atmosfera. Assim, uma árvore que tenha uma copa com cerca de 10 m de diâmetro chega a liberar mais de 1000 L de água para a atmosfera em um dia, e aproximadamente 20 bilhões de

toneladas de água considerando toda a Amazônia (Nobre, 2014).

A partir de medidas da *Aerosol RObotic NETwork* (AERONET) que realiza sensoria-mento remoto de aerossóis na superfície, foram obtidos os valores da altura da coluna de vapor d'água entre 2016 e 2022 para o sítio ATTO e entre 2000 e 2022 em Rio Branco. A Figura 3.4 apresenta os valores da altura da coluna de vapor d'água no sítio ATTO entre 2016 e 2022 e em Rio Branco entre 2000 e 2021. A séries temporais da coluna de vapor d'água mostram que em seus respectivos períodos seus valores se mantiveram constantes entre 3 e 5 cm. O gráfico da variação anual da coluna de vapor d'água mostrou que entre os meses de janeiro e abril a altura da coluna de vapor d'água é de aproximadamente 5 cm entre e de 3,4 cm entre junho e agosto.

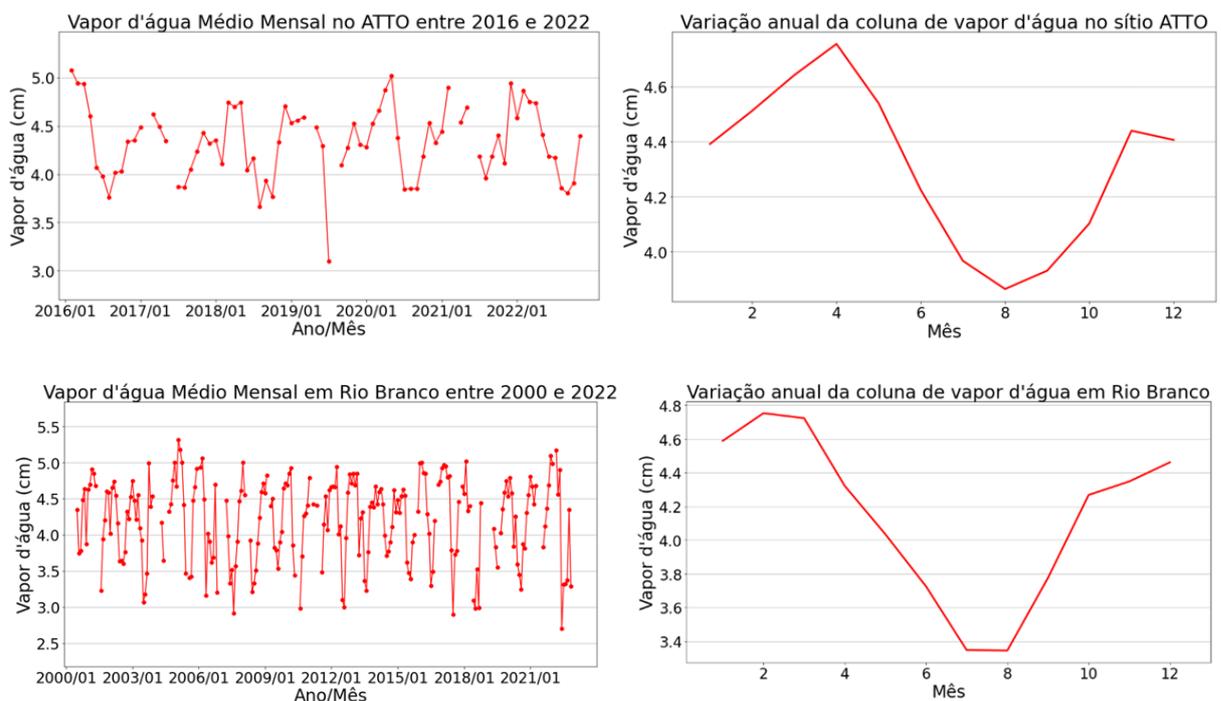


Figura 3.4: Séries temporais da altura da coluna de vapor d'água à esquerda e variação anual do tamanho da coluna de vapor d'água à direita a partir de medidas da rede AERONET para ATTO (topo) e Rio Branco (base).

Assim, a alta concentração de vapor de água na atmosfera atua como uma limitação para sensores de satélite ao realizarem medidas GEE na atmosfera, pois o vapor d'água e esses gases compartilham das mesmas faixas de comprimento de onda de absorção.

3.2 Aspectos meteorológicos das áreas de estudo

A precipitação e o fluxo radiativo nos sítios ATTO e K67/SAN apresentam padrões interanuais como foram apresentados por Andreae et al. (2015); Restrepo-Coupe et al. (2021); Hutrya et al. (2007). Nas Figuras 3.5 e 3.6 vemos os valores de precipitação média para os sítios ATTO entre 2012 e 2014 e K67/SAN entre 2002 e 2004, apresentaram um

perfil semelhante, com níveis mais altos de precipitação nos primeiros meses de cada ano entre fevereiro e maio e menores entre julho e outubro, aproximadamente.

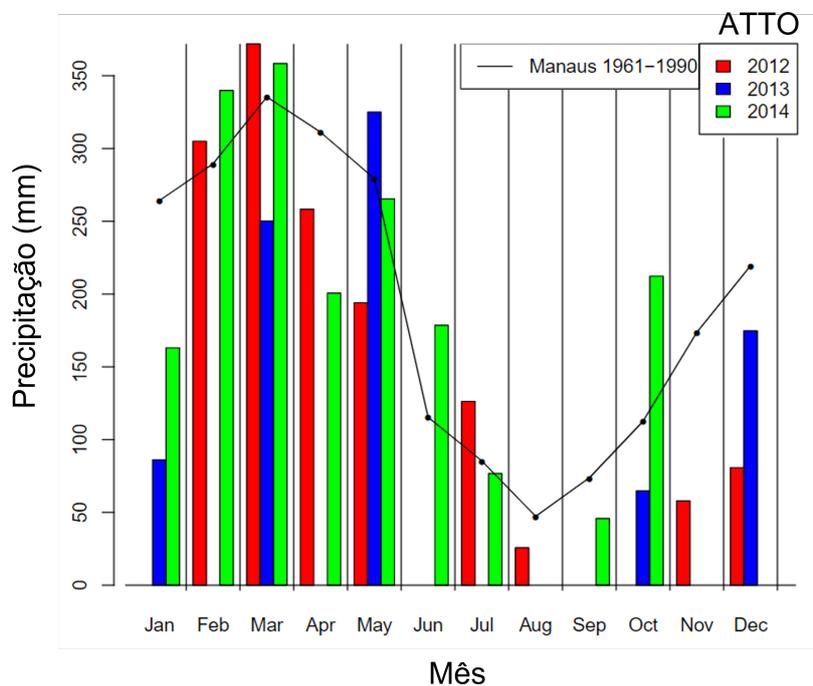


Figura 3.5: Precipitação mensal para o sítio ATTO entre os anos de 2012 e 2014 e dados de precipitação medidos pelo INMET em Manaus entre 1961 e 1990 utilizados como referência na comparação com as medidas no ATTO. Adaptado de: [Andreae et al. \(2015\)](#)

Para [Andreae et al. \(2015\)](#), durante o período chuvoso o mês com o maior nível de precipitação médio em Manaus ocorreu em março com 335.4 mm e o mês com menor precipitação média ocorreu em agosto, durante a estação seca, com 47.3 mm, utilizando medidas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) entre 1961 e 1990.

[Restrepo-Coupe et al. \(2021\)](#) analisou variáveis meteorológicas em 4 locais distintos na Amazônia, incluindo o sítio K67/SAN. Em K67/SAN eles verificaram que o período com maior precipitação média nesse local variou entre fevereiro e maio e que os meses com menor precipitação média variaram entre julho e novembro.

O fluxo de radiação de onda curta incidente na região Amazônica foi analisado por [Restrepo-Coupe et al. \(2021\)](#), como pode ser visto na Figura 3.6. Assim, o período com maior fluxo radiativo nos 4 locais analisados ocorreu durante a estação seca, devido a menor cobertura de nuvens nesse período em comparação com a estação chuvosa, incluindo o sítio K67/SAN que também foi analisado.

[Carneiro and Fisch \(2020\)](#) conduziram uma estudo que observou o ciclo diurno da camada limite planetária (CLP) na Amazônia durante dois períodos entre 15 de fevereiro e 31 de março de 2014 e entre 1 de setembro e 15 de outubro de 2014. Na Figura 3.7 vemos o resultado da variação da altura da CLP medida com diferentes instrumentos para os dois períodos. Em ambos os períodos foi observada a formação da camada limite noturna (CLP)

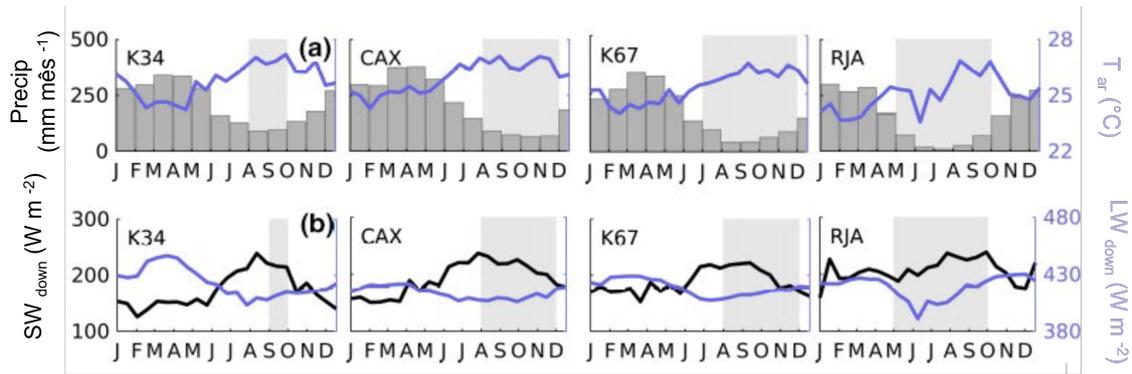


Figura 3.6: Variação anual com médias de 16 dias para (a) precipitação (Precip; mm mês⁻¹; barras em cinza), temperatura do ar (T_{ar}; °C) e (b) fluxo de radiação de comprimento de onda curto incidente (SW_{down}; W m⁻²) e radiação de onda longa (LW_{down}; W m⁻²) para 4 locais na Amazônia, incluindo o sítio K67/SAN (K67). Adaptado de: Restrepo-Coupe et al. (2021)

entre 00:00 e 03:00 no horário local, com o nascer do sol às 06:00 aproximadamente, essa CLN começa o seu processo de erosão com a incidência de radiação solar e início do fluxo de calor sensível. Entre 15 de fevereiro e 31 de março de 2014 a erosão foi completada às 09:00 e entre 1 de setembro e 15 de outubro de 2014 a erosão foi completada mais cedo às 08:00.

Além disso, após a completa erosão da CLN é desenvolvida a camada limite convectiva (CLC). Entre 15 de fevereiro e 31 de março de 2014 a CLC foi formada às 11:00 com 850 m de altura, atingindo o seu máximo às 13:00 com altura de 1180 metros aproximadamente. Durante o período entre 1 de setembro e 15 de outubro de 2014 a profundidade máxima dessa camada foi alcançada em 13:30 com altura de 1590 metros.

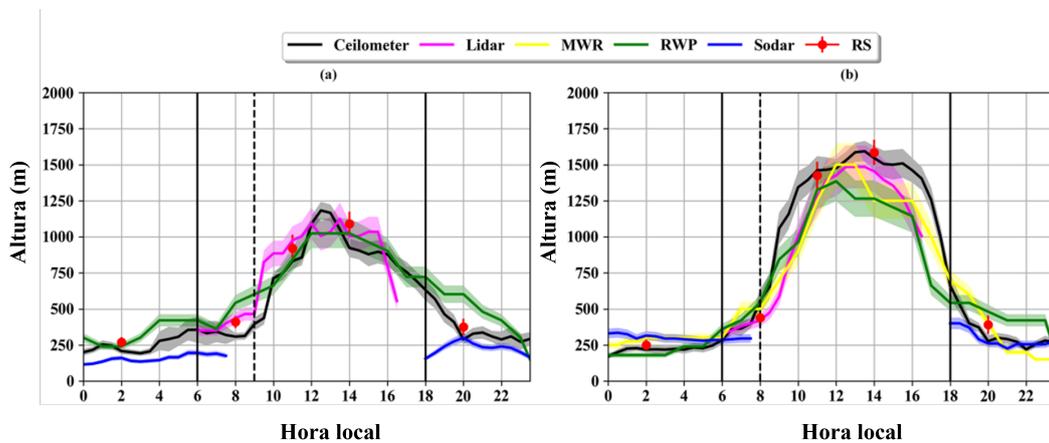


Figura 3.7: Ciclo diário da altura da CLP durante os períodos entre 15 de fevereiro e 31 de março de 2014 (a) e 1 de setembro e 15 de outubro de 2014 (b). As linhas verticais representam o horário nascer do sol em horário local (06:00), pôr do sol (18:00) (linha cheia) e da erosão CLN (linha tracejada). Adaptado de: Carneiro and Fisch (2020)

Assim, os resultados de [Carneiro and Fisch \(2020\)](#) mostraram como o ciclo diurno da camada limite planetária, envolvendo a erosão da CLN e formação da CLC, está condicionado pela maior disponibilidade de energia nas horas iniciais da manhã e também entre cada um dos períodos e do quanto dessa radiação é utilizada para aquecer a atmosfera.

Neste trabalho também foram analisados os aspectos meteorológicos associados a precipitação e a radiação incidente em cada um dos sítios analisados (ATTO e K67/SAN). Os instrumentos utilizados para medir precipitação e radiação em ATTO e K67/SAN estão listados na Tabela 3.1, juntamente com o período a que elas correspondem e onde estão disponíveis.

Tabela 3.1: Tabela com informações a respeito das medidas de superfície no sítio ATTO e na torre K67/SAN, intervalo de tempo das medidas utilizadas, a latitude e longitude do local, altura em que as medidas de torre utilizadas foram obtidas, as variáveis e o instrumento utilizado. Fonte: Adaptado de [Andreae et al. \(2015\)](#); [De Gonçalves et al. \(2013\)](#)

Sítio experimental	Período	Variável	Instrumento
ATTO	jan/2013 - dez/2018	Precipitação (mm)	Rain gauge (TB4, Hydrological Services Pty. Ltd., Australia)
ATTO	jan/2013 - dez/2018	Fluxo radiativo (SW) (W/m ²)	Piranômetro (CMP21, Kipp & Zonen, Netherlands)
K67/SAN	jan/2002 - jan/2019	Precipitação (mm)	<i>Tipping bucket</i> Texas Electronics 076B-4
K67/SAN	jan/2002 - jan/2019	Fluxo radiativo (SW) (W/m ²)	Radiômetro CNR1 (Kipp & Zonen CM3 ISO- class)

3.3 Monitoramento de gases de efeito estufa

3.3.1 Medidas de CO₂ e CH₄ em superfície na Amazônia

Com os objetivos de compreender o funcionamento da floresta Amazônica como uma entidade regional e de que formas as mudanças no uso da terra nessa região e no clima podem afetar seus serviços ecossistêmicos e impactar no clima global, em 1993 o experimento LBA começou a ser desenvolvido pela comunidade científica brasileira e outros parceiros internacionais. Esse experimento de escala continental entrou em plena operação em 1998 e conta com torres de fluxos espalhadas pela Amazônia brasileira, como pode ser visto na Figura 3.8. Depois do LBA surgiram outros experimentos interessados em monitorar a meteorologia e fluxos na região Amazônica, como o ATTO próximo à Manaus, o projeto Tanguro em uma região de florestas de transição entre a Amazônia e o cerrado, bem como locais fora dos limites brasileiros como no Peru e na Guiana Francesa.

Existem ainda os experimentos que analisam os fluxos de carbono na região Amazônica utilizando o sensoriamento remoto com aviões que sobrevoam as regiões de interesse em diferentes altitudes a fim de constituir um perfil vertical para o composto atmosférico monitorado. Como em [Webb et al. \(2016\)](#) que obteve perfis verticais de CH₄ de aproximadamente 7 km a partir da superfície para 5 locais distintos na Amazônia (Tabatinga,



Figura 3.8: Locais na Amazônia em que são realizadas medidas de micrometeorologia e fluxos de carbono em torres. Adaptado de: Chambers et al. (2021)

Rio Branco, Santarém, Alta Floresta e Salinópolis) e que mostram que a concentração de CH₄ varia pouco ao longo da coluna atmosférica acima da camada limite planetária, como pode ser visto nos perfis verticais para Salinópolis e Rio Branco em 3.9. Similarmente os perfis verticais de CO₂ na região Amazônica são aproximadamente constantes ao longo da coluna atmosférica, como pode ser visto nos perfis verticais de CO₂ construídos a partir de medidas de avião entre 2010 e 2018 para Tabatinga, Rio Branco, Alta Floresta e Santarém em Gatti et al. (2021) (Figura 3.10).

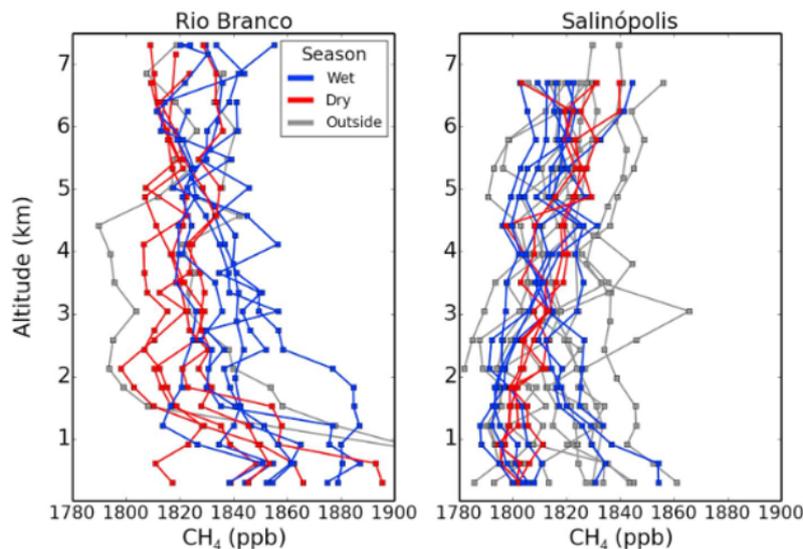


Figura 3.9: Perfis verticais de CH₄ para Rio Branco e Salinópolis na Amazônia obtidos a partir de medidas utilizando aviões. Adaptado de: Webb et al. (2016).

Diante das dimensões geográficas do bioma Amazônico, as medidas realizadas em superfície e as que utilizam sensoriamento remoto com aviões apresentam limitações na resolução espacial ou temporal, de modo que utilizar outras fontes de medidas, como as provenientes de sensores a bordo de satélites em órbita podem ser úteis no estudo do ciclo

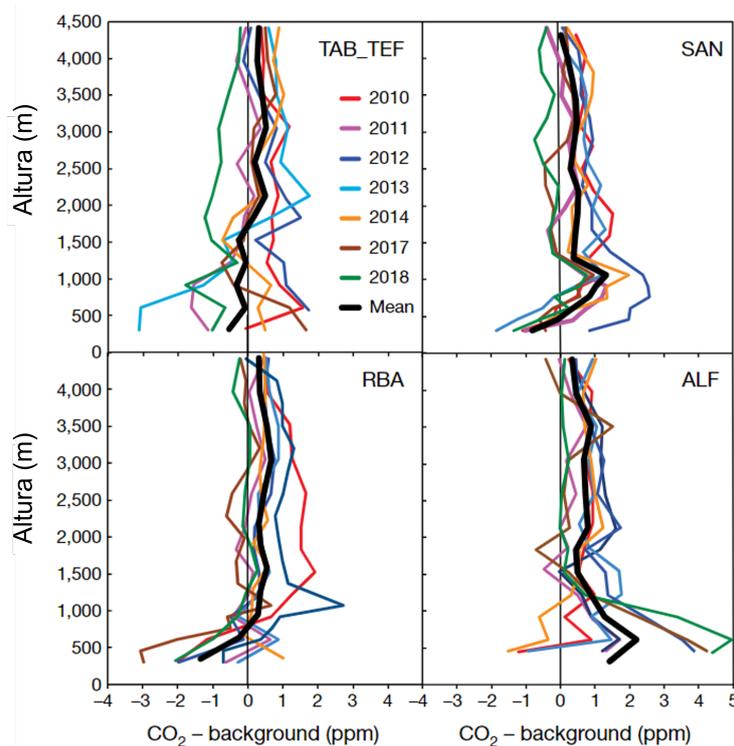


Figura 3.10: Perfis verticais médios anuais de CO_2 , com valores de *background* subtraídos para cada local analisado por Gatti et al. (2021) entre 2010 e 2018, em que o valor médio considerando todos os anos está representado em preto. Adaptado de: Gatti et al. (2021).

do carbono e das emissões de carbono pela floresta para tornar esse conhecimento mais robusto.

3.3.2 Instrumentação envolvida na obtenção de medidas de CO_2 e CH_4 em superfície

No sítio ATTO e em K67/SAN as medidas de CO_2 e CH_4 são feitas por meio de técnicas espectroscópicas de absorção no infravermelho. No ATTO, o equipamento utilizado nesse processo é um analisador Picarro G1302 (Figura 3.11) que é uma espectrômetro de cavidade ressonante do tipo *ring-down* e em K67/SAN as concentrações de CO_2 são obtidas através do analisador de gás por infravermelho Licor 6262 (Figura 3.12) (Tabela 3.2).

As medidas de CO_2 e CH_4 realizadas do sítio ATTO são feitas em contêineres refrigerados na base da torre de 80 metros. Ao longo da torre em que são coletadas as amostras de CO_2 e CH_4 no sítio ATTO existem 5 entradas de ar em 79, 53, 38, 24 e 4 metros acima da superfície, em que as medidas são feitas em contêineres refrigerados na base da torre de 80 metros utilizando um instrumento Picarro G1301. As medidas obtidas no sítio ATTO podem ser solicitadas em <https://attodata.org/>.

Na espectroscopia de *ring-down* o feixe de laser atravessa uma cavidade formada por três espelhos com refletividade de 99,999% e um fotodetector com rápida detecção.

Quando o fotodetector alcança uma voltagem limite ele é desligado e o feixe segue passando de um espelho para o outro até que a intensidade começa a diminuir exponencialmente. Esse decaimento é medido em tempo real pelo detector e para o caso em que a cavidade está vazia ele é devido apenas à refletividade dos espelhos. Então, para determinar a concentração de gases quando a cavidade está preenchida por eles, o laser é ajustado em diferentes comprimentos de onda em que esses gases absorvem, em que a concentração é derivada da diferença entre esses tempos de decaimento e por isso é independente de flutuações nas intensidades do laser ou da potência absoluta (Picarro, 2022)(Figura 3.11).



Figura 3.11: Equipamento PICARRO à esquerda e intensidade da luz em função do tempo em um sistema de espectroscopia de *ring-down* de cavidade com e sem uma amostra. Adaptado de: Picarro (2022).

Em K67/SAN foram obtidas amostras de ar em 8 níveis ao longo da torre a 62,2, 50, 39,4, 28,7, 19,6, 10,4, e 0,91 metros a partir da superfície. Essas amostras são coletadas através de um sistema de fluxo em que as suas concentrações são obtidas com o auxílio de um analisador de gás por infravermelho Licor-6262. As medidas realizadas em K67/SAN foram obtidas através dos seus responsáveis em K67/SAN, cujas informações podem ser encontradas em <https://ameriflux.lbl.gov/sites/siteinfo/BR-Sa1>.

No Licor-6262 as medidas ocorrem através da transmissão da radiação IR em uma célula preenchida com gás cuja concentração de CO_2 é conhecida (célula de referência). Uma segunda célula contém o gás com concentração desconhecida que também interage com a radiação IR que incide sobre a amostra. O produto dessa análise resulta em uma quantidade de voltagem proporcional à diferença em absorção entre os dois casos, que é utilizada para obter a concentração do gás. (LI-COR, Inc, 1996).

A Tabela 3.2 sintetiza as informações a respeito das medidas em superfície realizadas nos sítios ATTO e K67/SAN. Importante salientar que ambos os sensores são calibrados com padrões primários ou secundários fornecidos pela NOAA.

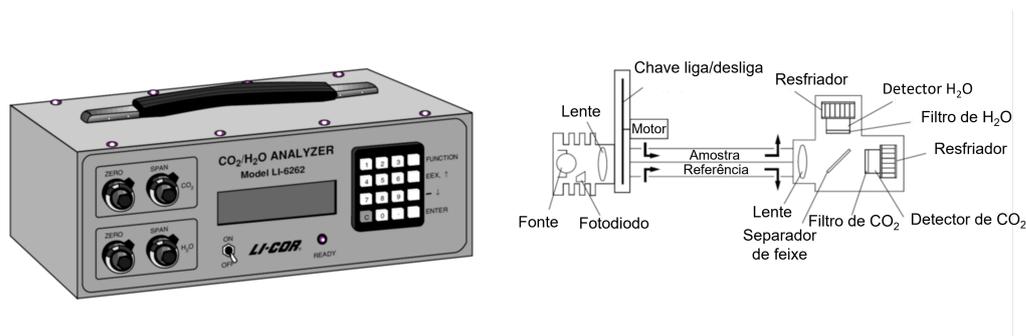


Figura 3.12: Ilustração do equipamento Licor-6262 à esquerda e seu esquema de funcionamento à direita. Adaptado de: [LI-COR, Inc \(1996\)](#).

Tabela 3.2: Tabela com informações a respeito das medidas de superfície no sítio ATTO e na torre K67/SAN, intervalo de tempo das medidas utilizadas, a latitude e longitude do local, altura em que as medidas de torre utilizadas foram obtidas, as variáveis e o instrumento utilizado. Fonte: Adaptado de [Andreae et al. \(2015\)](#); [De Gonçalves et al. \(2013\)](#)

Sítio experimental	Período	Lat, Lon	Altura	Variável	Instrumento
ATTO	janeiro/2012 - maio/2021	-2,14°; -59°	79 m	CO ₂ , CH ₄	Picarro G1302
K67/SAN	janeiro/2002 - janeiro/2019	-2,86°; -55°	62 m	CO ₂	Licor 6262

3.3.3 Medidas de XCO₂ e XCH₄ por sensoriamento remoto de satélites

O monitoramento da concentração de GEE na atmosfera por satélites é uma abordagem recente, que teve início há apenas 20 anos, quando os primeiros sensores começaram a ser utilizados e seus dados disponibilizados publicamente. O *SCanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric CHartography* (SCIAMACHY) e o *Atmospheric Infrared Sounder* (AIRS) são instrumentos que foram desenvolvidos para realizar medidas de componentes que influenciam na química atmosférica. O SCIAMACHY operou a bordo do *Environmental Satellite* (ENVISAT) por dez anos de 2002-2012, enquanto o AIRS ainda segue em funcionamento. Em 2009, o satélite GOSAT da JAXA foi primeiro satélite desenhado especificamente para monitorar CO₂ e CH₄ e segue em operação até hoje ([Matsunaga and Maksyutov, 2018](#)).

Em julho de 2014, a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) lançou seu primeiro instrumento projetado para medir CO₂. Em 2017 a *European Space Agency* (ESA), juntamente com a Comissão Europeia e o Gabinete Espacial dos Países Baixos lançou o sensor TROPOMI junto com a missão Sentinel-5P, com o objetivo monitorar a qualidade do ar e o clima, e um dos produtos fornecidos pelo sensor é a concentração de metano na coluna atmosférica com alta resolução espacial e temporal ([Group on Earth Observations \(GEO\) et al., 2021](#); [Apituley et al., 2021](#)).

Os satélites que monitoram GEE na atmosfera orbitam a Terra com altitudes entre 670-824 km a partir da superfície e carregam em si instrumentos que detectam radiação entre os comprimentos de onda do infravermelho de ondas curta (SWIR) até infravermelho térmico (TIR). E os sensores que medem GEE são passivos, ou seja, não possuem fonte de radiação própria e se utilizam da radiação solar refletida pela superfície para realizarem suas medidas (Jacob et al. (2016)). Esses sensores não medem as concentrações de CO₂ e CH₄, por exemplo, de forma direta, mas os comprimentos de onda resultantes da interação da radiação emitida pela superfície com esses compostos atmosféricos. Assim, essas radiâncias espectrais são inseridas em modelos de inversão que calculam a concentração média do gás de interesse ao longo da coluna atmosférica de ar seco, XCO₂ e XCH₄ para o caso do dióxido de carbono e do metano (Eldering et al., 2017; Qu et al., 2021).

O fluxograma da Figura 3.13 apresenta os processos envolvidos na obtenção da concentração média do gás em questão na coluna de ar seco por meio da abordagem conhecida como *full-physics* utilizada por O'Dell et al. (2012), descrevendo o processo de inversão utilizado pelo modelo *Atmospheric CO2 Observation from Space* (ACOS) na obtenção das concentrações de XCO₂ a partir das medidas do OCO-2 e GOSAT.

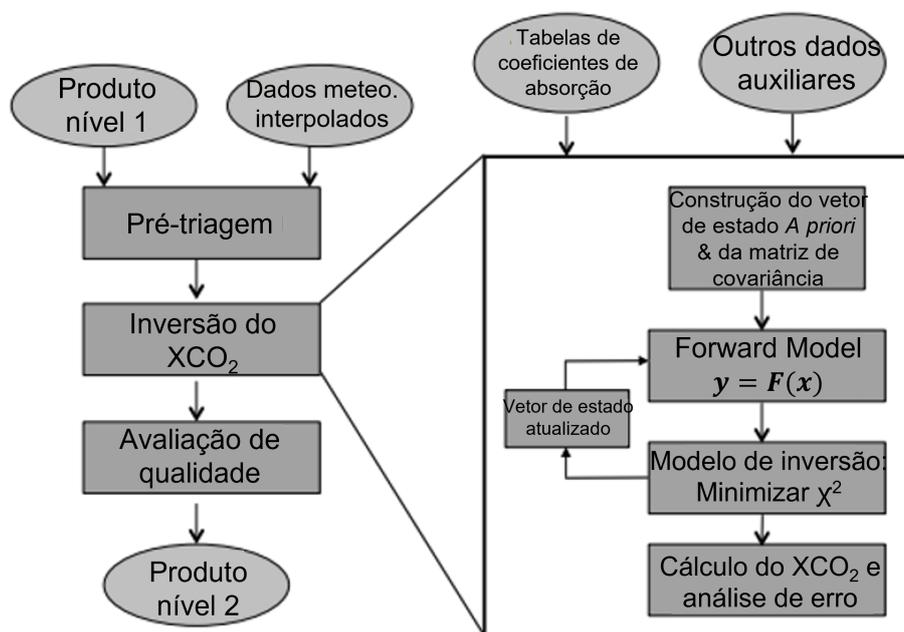


Figura 3.13: Fluxograma representando as etapas da inversão para a obtenção do produto de nível 2. Adaptado de: O'Dell et al. (2012).

Assim, as medidas das radiâncias espectrais constituem os produtos de nível 1 (L1) que passam por um tratamento a fim de eliminar dados de baixa qualidade como aqueles classificados como cenas com nuvens. Então, os produtos L1 juntamente com informações meteorológicas e outras bases de dados, como tabelas de coeficientes de absorção, são

inseridos no modelo de inversão, como na Equação 3.1 Crisp et al. (2017); O'Dell et al. (2012).

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{b}) + \varepsilon \quad (3.1)$$

Em que \mathbf{y} é o vetor formado pelas observações (produtos L1) e \mathbf{x} é o vetor de estado formado por quantidades físicas sensíveis ao espectro de absorção medido. O vetor de estado utilizado no modelo de inversão ACOS inclui CO_2 , pressão de superfície, temperatura, dois tipos de aerossol, albedo, entre outros (O'Dell et al. (2012)). Dessa forma, o modelo de inversão realiza uma série de aproximações a fim de simular o espectro que melhor combine com o espectro observado ao mesmo tempo que é limitado pela informação a priori presente no vetor de estado. Assim, o vetor de estado que minimize a função custo acoplada ao modelo conterá dentre os vários parâmetros o perfil vertical do gás em questão na coluna de ar seco (O'Dell et al., 2012). Em que a definição de $X\text{CO}_2$ adotada no modelo de inversão ACOS é dada por:

$$X\text{CO}_2 = \frac{\int_0^\infty u(z) N_d(z) dz}{\int_0^\infty N_d(z) dz}, \quad (3.2)$$

Em que $u(z)$ é a fração molar de CO_2 com relação ao ar seco a uma altitude z , e $N_d(z)$ é a densidade total do número de moléculas de ar seco a uma certa altitude z .

Um método similar ao detalhado anteriormente pode ser usado para obter as concentrações de metano na coluna de ar seco, como é o caso do modelo RemoTeC, utilizado na inversão de medidas do Lorente et al. (2021). Entretanto, sensores que operam no mesmo comprimento de onda de absorção do CO_2 e do CH_4 ($1,6 \mu\text{m}$) têm a opção de utilizar uma outra abordagem nos modelos de inversão, a conhecida como *proxy*. Esse tipo de inversão visa obter a razão entre as densidades dos perfis verticais de CO_2 e CH_4 (V_{CH_4} e V_{CO_2} , respectivamente), resultando na concentração de $X\text{CH}_4$ ao multiplicar essa quantidade pela concentração de $X\text{CO}_2$ de modelos como o *CarbonTracker* (Equação 3.3).

$$X\text{CH}_4 = \frac{V_{\text{CH}_4}}{V_{\text{CO}_2}} \cdot X\text{CO}_{2\text{modelo}} \quad (3.3)$$

A abordagem *full-physics* tem a vantagem de não depender da informação a priori do CO_2 , porém eles são mais complexos e possuem uma demanda computacional maior. Além disso, os modelos de inversão que utilizam a banda de $2,3 \mu\text{m}$ para o metano, como é o caso do RemoTeC, podem falhar dependendo do albedo da superfície, por causa da interferência do vapor d'água que absorve radiação nesse mesmo comprimento de onda (Hu et al., 2018). Como o CO_2 sofre menos variabilidade na atmosfera, a abordagem *proxy* pode ser mais vantajosa na obtenção das concentrações de $X\text{CH}_4$, pois além de ter um melhor desempenho computacional, ela calcula concentrações com precisão e exatidão similares as da inversão *full-physics*, evitando alguns bias que são eliminados na razão

entre as densidades de CO₂ e CH₄ (Hu et al., 2018).

3.3.4 Instrumentação envolvida na obtenção de medidas de XCO₂ e XCH₄ por sensoriamento remoto de satélites

Os três sensores de satélites explorados nesse trabalho são espectrômetros que detectam radiação refletida e/ou emitida pela superfície terrestre, percorrem órbitas sincronizadas com o sol, cujas altitudes variam de 675-843 km, como pode ser visto na Tabela 3.3 e seus horários de passagem são às 13:30h para o OCO-2 e TROPOMI e às 13h para o GOSAT (horário local).

O GOSAT é o primeiro satélite desenhado para medir a partir do espaço concentrações de CO₂ e CH₄ com seus sensores. Em funcionamento desde janeiro de 2009, ele faz parte de um projeto desenvolvido em conjunto pelo Ministério do Meio Ambiente Japonês, o *National Institute for Environmental Studies* (NIES) e a JAXA. Um dos principais objetivos dessa missão é estimar emissões e absorções de gases de efeito estufa em escala subcontinental mais precisamente, contribuindo para a análise de emissões e absorções de carbono em escala regional relacionadas ao balanço de carbono nos ecossistemas presentes nas regiões continentais JAXA (2021).

A órbita do GOSAT é sincronizada com o sol, suas medidas possuem 10 km de diâmetro e o período necessário para cobrir todo o globo e retornar ao ponto inicial de suas medidas é de 3 dias. Nesse período ele realiza 56 mil medidas, das quais apenas entre 2% e 5% são usáveis, ou seja, são identificadas com condições de céu limpo JAXA (2021).

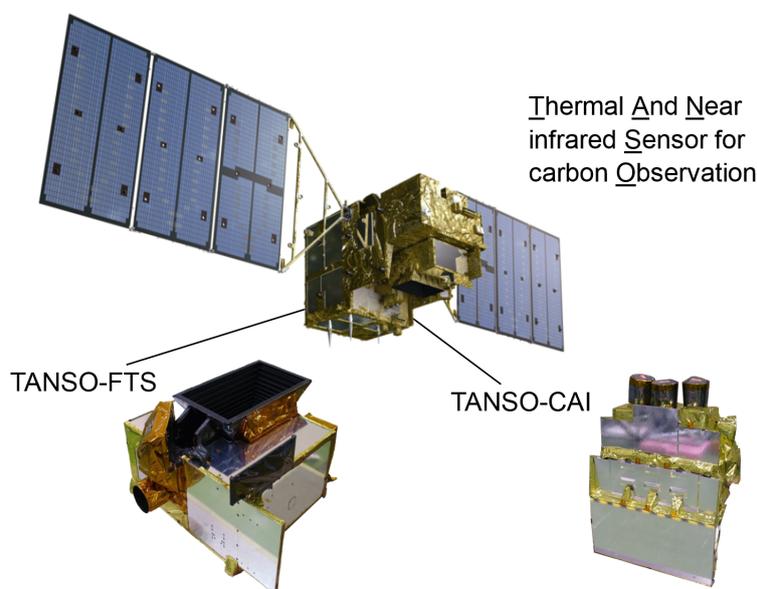


Figura 3.14: Imagens dos sensores TANSO e CAI presentes em órbita no satélite GOSAT. JAXA Mission & Instrument (2009).

Esse satélite está equipado com dois instrumentos, o *Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observation* (TANSO), com suas duas subunidades: o *Fourier Transform*

Spectrometer (FTS) e o *Cloud and Aerosol Imager* (CAI). O FTS é responsável por medir a radiação solar refletida pela superfície e pela atmosfera em uma larga faixa que vai do SWIR ao TIR, que correspondem às bandas de absorção das espécies-alvo do instrumento, que são: O₂ (0,758-0,775 μm), CO₂ e CH₄ (1,56-1,72 e 5,56-14,3 μm) e CO₂ e H₂O (1,92-2,08 μm) [JAXA \(2021\)](#); [Liang et al. \(2017\)](#).

Para verificar o estado da atmosfera e da superfície durante o dia, o GOSAT utiliza o sensor CAI que determina a presença de nuvens sobre uma determinada área que inclui o campo de monitoramento do FTS. O sensor CAI produz imagens a partir da visualização da atmosfera e da superfície durante o dia e utiliza essas informações para corrigir os efeitos causados pelas nuvens e aerossóis no espectro de absorção obtido pelo TANSO ([JAXA, 2021](#); [Liang et al., 2017](#)).

O OCO-2 é um sistema que quantifica a fração molar média de ar seco de CO₂ na coluna atmosférica (XCO₂) de fontes e sumidouros em escalas regionais com dimensões maiores que 1000 km com resolução espacial de 1,29 x 2,25 km. Esse sensor voa em uma órbita polar sincronizada com o sol, fornecendo cobertura global com um ciclo de repetição de 16 dias, cruzando o equador aproximadamente às 13h35, horário local.

Desenvolvido pela NASA, o OCO-2 foi lançado em julho de 2014, aproximadamente 5 anos após a tentativa de lançar seu predecessor o OCO que não foi bem sucedida [JPL/OCO-2 Science \(2014\)](#). Com isso NASA passou a colaborar com a JAXA que teve um papel importante no desenvolvimento dos primeiros algoritmos para a estimativa do CO₂ a partir de sensoriamento remoto [JPL/OCO-2 History \(2014\)](#).

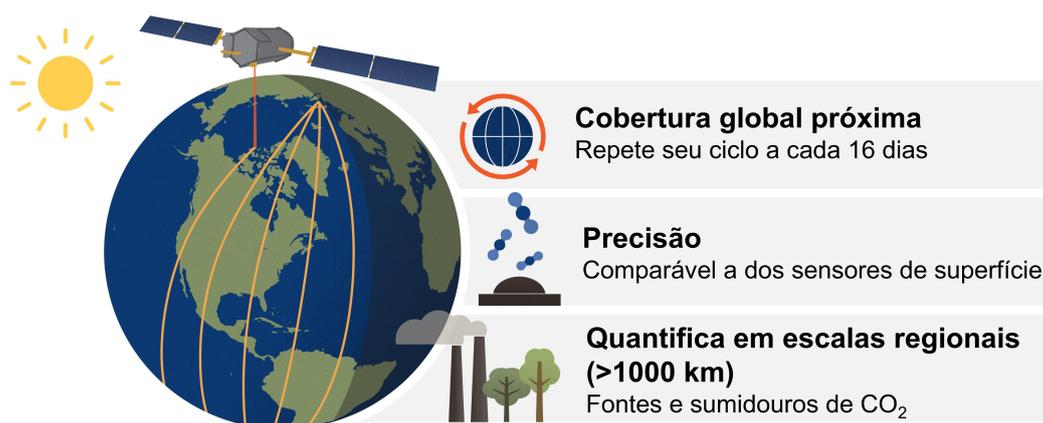


Figura 3.15: Ilustração com a representação do sensor OCO-2 e informações sobre as medidas desse instrumento. Adaptado de: [JAXA Mission & Instrument \(2009\)](#).

Esse sensor detecta a radiação solar refletida pela superfície terrestre em comprimentos de onda específicos, como podem ser vistos na Tabela 3.4, registrando a absorção do CO₂. Para isso são utilizadas três bandas específicas de comprimento de onda NIR: do oxigênio molecular (O₂) em ~0,765 μm e em 1,61 e 2,06 μm que são as bandas de absorção fraca e

forte do CO₂, respectivamente. O comprimento de onda da banda fraca de CO₂, próximo a 1,61 μm, é mais sensível à concentração de CO₂ perto da superfície. Como outros gases atmosféricos não absorvem energia significativamente dentro dessa faixa espectral, as medidas nessa banda são relativamente claras e inequívocas (Eldering et al., 2017).

A banda forte do CO₂, próximo a 2,06 μm, fornece uma segunda medida totalmente independente da abundância de CO₂. Os espectros de banda de 2,06 μm são muito sensíveis à presença de aerossóis. A capacidade de detectar e mitigar a presença de aerossóis aumenta a precisão do XCO₂. As medidas da banda de 2,06 μm também são sensíveis a variações na pressão atmosférica e umidade ao longo do caminho óptico. Para garantir que a derivação precisa de XCO₂, também é feita uma medição comparativa da absorção de O₂ próximo a 0,76 μm. A concentração O₂ molecular é constante, bem conhecida e distribuída uniformemente por toda a atmosfera e utilizadas como indicativo da presença de nuvens e aerossóis opticamente espessos que impedem as medidas de CO₂ na coluna completa JPL/OCO-2 Measurement Approach (2014).

O TROPOMI, presente no satélite Sentinel-5P (S-5P) é um instrumento realiza medidas de NO₂, SO₂, CO, CH₄, O₃, formaldeído (HCHO), material particulado e aerossóis para estudar a qualidade do ar, O₃ e radiação UV e o monitoramento climático. Ele faz parte de uma série de satélites os “Sentinel”, desenvolvidos pela ESA, em que esse é o primeiro a monitorar a composição da atmosfera ESA (2017).

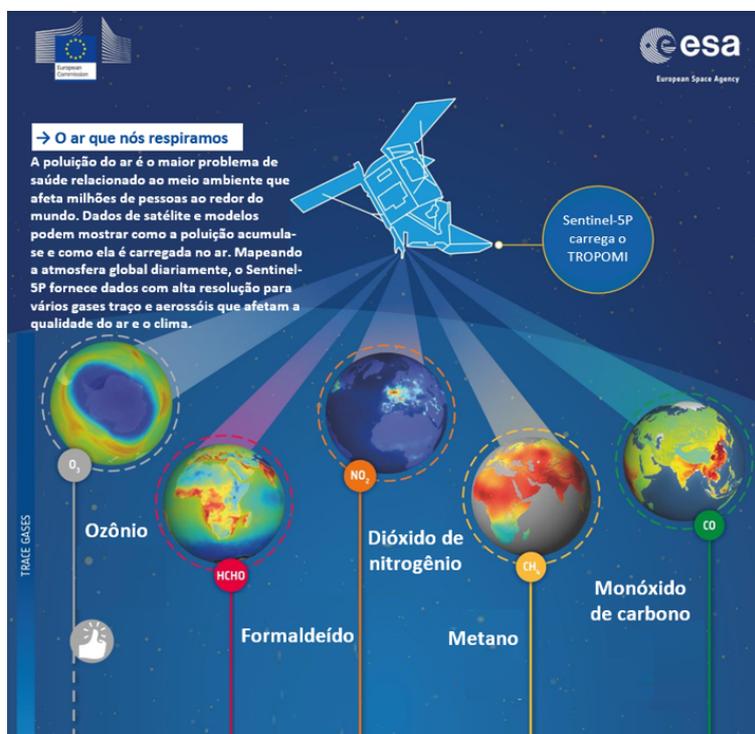


Figura 3.16: Ilustração representando o sensor TROPOMI a bordo do satélite Sentinel-5P e as variáveis monitoradas por ele do espaço. KNMI (2021).

O S-5P está a 842 km de altitude e mapeia toda a atmosfera em um único dia, sua reso-

lução espacial é de 5,5 x 3,5 km, o que é um diferencial em relação aos seus predecessores que realizam medidas espectroscópicas, podendo monitorar a qualidade do ar ao nível de cidades. Comparando com o GOSAT, sua resolução espacial de também é maior e ainda realiza cerca de 100 vezes mais medições (Qu et al., 2021).

As medidas realizadas pelo TROPOMI são obtidas a partir de quatro detectores em 8 bandas que cobrem os espectros UV e visível (0,27 a 0,50 μm), o NIR (0,675 a 0,775 μm) e o SWIR (2,305 a 2,385 μm). A faixa do SWIR corresponde a utilizada na obtenção da concentração de XCH₄. A verificação da presença de nuvens nas medidas de metano do TROPOMI é feita a partir das medidas do sensor *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) a bordo de outro satélite (Suomi-NPP), em que ambos cruzam o equador no mesmo horário as 13:30 horário local Qu et al. (2021); ESA (2017).

Tabela 3.3: Aspectos técnicos dos sensores TANSO (GOSAT), OCO-2 e TROPOMI, incluindo data de lançamento, resolução espacial, *swath* e horário de passagem.(Apituley et al. (2021); OCO-2 Science Team/Michael Gunson (2021); JAXA (2021))

Sensor	Data início	Resolução Espacial (km)	Swath (km)	Horário de passagem
GOSAT	jan/2009	10,5	790	13h
OCO-2	jul/2014	1,29 x 2,25	10	13h30
TROPOMI	out/2017	5,5 x 7,0	2600	13h30

Tabela 3.4: Faixas de frequências utilizadas no espectro infravermelho para a derivação de concentração de GEE ao longo da coluna atmosférica para os sensores TANSO, OCO-2 e TROPOMI (Apituley et al., 2021; OCO-2 Science Team/Michael Gunson, 2021; JAXA, 2021).

TANSO	OCO-2	TROPOMI
CO ₂ / CH ₄ (1,56-1,72 μm)	CO ₂ fraco (1,61 μm)	CH ₄ (2,305-2,385 μm)
CO ₂ / CH ₄ (5,56-14,3 μm)	CO ₂ forte (2,06 μm)	CO ₂ e H ₂ O (1,92-2,08 μm)
O ₂ (0,758-0,775 μm)	O ₂ (0,76 μm)	O ₂ (0,76 μm)

O produto MERGED, diferentemente dos outros casos, não é proveniente de um sensor específico que participa de alguma missão em órbita. Ele é um produto que cobre o período entre 2003 e 2020, combinando medidas dos produtos do SCIAMACHY (2002-2012), GOSAT (2009-2020) e OCO-2 (2014-2020) para XCO₂, e do SCIAMACHY (2002-2012) e do GOSAT (2009-2020) para XCH₄ utilizando o algoritmo *Ensemble Median Algorithm* (EMMA) (Buchwitz et al., 2018; Reuter et al., 2021).

O CAMS monitora concentrações de CO₂ e CH₄ na atmosfera a partir de medidas de instrumentos em superfície e a bordo de satélites inseridos em modelos que simulam as

concentrações desses gases. Dessa forma, com os resultados das simulações o CAMS pode identificar também quando as observações e as simulações apresentam divergências, contribuindo para o conhecimento das estimativas das fontes e sumidouros de CO₂ e CH₄.

3.4 Aquisição dos produtos de XCO₂ e XCH₄ de sensoria- mento remoto de satélites e sua disponibilização

As medidas de XCO₂ e XCH₄ foram obtidas nas plataformas das agências responsáveis por cada um deles, como pode ser visto nas Tabelas 3.5 e 3.6. Para as medidas de XCO₂ do GOSAT, OCO-2, MERGED e CAMS as variáveis utilizadas foram: *xco2*, *latitude*, *longitude*, *time*, *xco2 quality flag* e *xco2 uncertainty* e para as medidas de XCH₄ do GOSAT e MERGED são: *xch4*, *latitude*, *longitude*, *time*, *xch4 quality flag* e *xch4 uncertainty*, e *methane mixing ratio*, *qa value*, *latitude*, *longitude*, *delta time* e *methane mixing ratio precision* para o TROPOMI. As outras informações a respeito desses produtos como seus nomes, o período e onde eles estão disponíveis também podem ser encontrados nas Tabelas 3.5 e 3.6.

Tabela 3.5: Conjunto dos produtos de XCO₂ de sensores a bordo de satélite utilizados, período e local onde está disponível de forma aberta.

Produto	Período	Disponível em:
TANSO-FTS e OCFP	maio/2009 a jun/2020	Copernicus CCS
OCO2L2LiteFP	set/2014 a jul/2021	Nasa Earth Data
MERGED e EMMA	jan/2003 a jun/2020	Copernicus CCS
CAMS	jun/2009 a dez/2021	CAMS

Tabela 3.6: Conjunto dos produtos de XCH₄ de satélite utilizados, período e local onde está disponível de forma aberta.

Produto	Período	Disponível em:
TANSO-FTS e OCPR	maio/2009 a jun/2020	Copernicus CCS
S5P_OFFL_L2_CH4	nov/2018 a dez/2021	Copernicus Open Access Hub
MERGED e EMMA	jan/2003 a jun/2020	Copernicus CCS
CAMS	jan/2009 a dez/2020	CAMS

3.5 A questão da colocação espaço-temporal das medidas de sensores de satélite

Com o propósito de comparar as medidas de concentração de GEE medidos por sensores de satélite com os aferidos em superfície nos sítios ATTO e na torre K67 em Santarém, foi feito um estudo detalhado da questão da colocação espaço-temporal de uma medida em relação à outra.

Sobre o conjunto das medidas de superfície foi feita a seleção temporal, de modo que foram consideradas apenas aquelas medidas que ocorreram ± 1 h em torno do horário de passagem dos satélites, ou seja, as medidas de superfície foram filtradas entre 12:30 e 14:30 (horário local). No sítio ATTO as medidas de concentração de CO₂ e CH₄ são registradas a cada 30 minutos desde janeiro de 2012. Neste caso, foi calculada média de seis observações para as concentrações de CO₂ e CH₄ apenas com os valores temporalmente filtrados no horário de passagem dos satélites. Para K67/SAN, que tem medidas a cada 1 hora desde 2002, foram calculadas médias de três observações para as concentrações de CO₂ com os valores temporalmente filtrados no horário de passagem dos satélites.

Com as medidas de satélite devidamente filtradas seguindo seus filtros internos de qualidade, foram delimitados raios espaciais em torno dos sítios experimentais, variando de 10 em 10 km até atingir um raio máximo de 500 km ao redor das coordenadas das medidas em superfície. Para cada área em torno das torres foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson (R) entre as medidas de satélite e as de superfície. O alcance das medidas *in situ* em relação às medidas de satélite foi determinado a partir dos valores de correlação com significância de 0.05.

Com o cálculo destes valores, foram calculados os correlogramas apresentados nas Figuras 4.17-4.18, que apresentam os valores de correlação entre as medidas de satélite e de superfície para cada possível raio de influência em torno das torres. Assim, as medidas de sensoriamento remoto foram delimitadas no raio de influência em que o valor correlação se torna constante.

Uma vez definidos os raios de influência dos produtos de satélite, foi possível calcular os parâmetros da validação: bias e erro médio quadrático, segundo as equações 3.4 e 3.5.

3.6 Cálculo de bias e erro médio quadrático da comparação

Buscando avaliar o desempenho dos diferentes satélites ao realizar medições sobre a Amazônia, dados de concentração de CO₂ e CH₄ de satélite foram comparados aos medidos em superfície no sítio ATTO e na torre K67/SAN por meio de dois métodos comuns de comparação de pares, o bias e erro médio quadrático (Loew et al. (2017)).

Uma diferença entre as medidas de sensoriamento remoto e as de superfície é que as medidas realizadas pelos sensores apresentam as concentrações de CO₂ e CH₄ integradas ao longo da coluna atmosférica, enquanto as realizadas nos sítios ATTO e K67/SAN foram obtidas em alturas específicas nas torres (79 e 62 metros). Porém, a comparação entre esses dois tipos de medidas é possível, pois a partir da altura da copa das árvores as concentrações de CO₂ e CH₄ são aproximadamente constantes (Figuras 4.3- 4.4 e 4.13). Assim, ao integrar as concentrações ao longo dos diferentes níveis das torres o resultado é aproximadamente o valor medido no topo.

3.6.1 Cálculo do bias

Baseado na diferença entre os valores médios dos pares de medidas analisadas, o método de cálculo de bias é capaz de quantificar a presença de diferenças sistemáticas de superestimação ou subestimação de um conjunto de dados com relação ao outro (Paca et al., 2022; Loew et al., 2017). Dessa forma, utilizando a Equação 3.4, calculou-se a diferença entre os valores de concentração de CO₂ e CH₄ de satélite e os de referência, medidos em superfície assumindo uma incerteza de 0,3% em seus valores.

$$Bias = XGEE_{SAT} - XGEE_{SOLO} \quad (3.4)$$

em que,

$$GEE_{SOLO} = \frac{\sum_{i=1}^N GEE_i}{N}$$

e

$$XGEE_{SAT} = \frac{\sum_{i=1}^M XGEE_i}{M}$$

Em que M é o número de medidas de satélite dentro do raio de influência e N é o número de datas distintas em que houve medidas de satélite.

3.6.2 Erro médio quadrático

A raiz do erro médio quadrático (RMSE) é um outro método que analisa a concordância entre dois conjuntos de dados, mas diferentemente do bias ele também é sensível a diferenças aleatórias e está relacionado com a precisão das medidas. Dessa forma, o RMSE foi utilizado como uma forma de avaliar o desvio das medidas de satélite em relação as de superfície.

Assim, o erro entre as medidas foi calculado utilizando a seguinte equação:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{d \in D} \sum_{i=1}^{N'(d)} (GEE_{SOLO}(d) - XGEE_{SAT}(d))^2}{N}}, \quad (3.5)$$

Em que, D é o conjunto de todos os dias em que houve medidas tanto do satélite quanto de superfície. $N'(d)$ é o número de medidas de satélite em um certo dia d . $XGEE_{SAT}(d)$ e $GEE_{SOLO}(d)$ são as concentrações medidas em um certo dia d pelo satélite e pela torre em superfície, respectivamente, e N é o número de dias diferentes em que o satélite realizou medidas.

O valores de bias e o RMSE foram escolhidos como métricas de análise da comparação entre as medidas dos sensores de satélite e as medidas em superfície no sítio ATTO e em K67/SAN por serem métodos robustos e constantes presentes em outros trabalhos que visaram algum tipo de comparação entre esses dois tipos de medidas ([Liang et al., 2017](#); [Paca et al., 2022](#); [Loew et al., 2017](#)).

Capítulo 4

Resultados e Discussões

As concentrações de CO₂ e CH₄ observadas entre 2012-2021 e 2002-2019 nos sítios ATTO e na torre K67/SAN foram inicialmente caracterizados. Assim, foram obtidas as taxas de crescimento anual de CO₂ e de CH₄, as suas sazonalidades, bem como a foi feita uma análise sobre a meteorologia dos locais de estudo nos sítios ATTO e K67/SAN.

As medidas de superfície nos sítios ATTO e na torre K67/SAN foram utilizados como valores de referência na comparação com as concentrações de XCO₂ e XCH₄ fornecidas pelos produtos do GOSAT, OCO-2, TROPOMI e MERGED na área de estudo, delimitada por um raio de influência determinado a partir do valor do coeficiente de correlação de Pearson (R) entre as medidas dos sensores e as de superfície.

As concentrações fornecidas por cada um dos produtos de satélite são periodicamente validadas por seus responsáveis em relação a medidas de superfície a fim de calibrar os instrumentos em órbita, bem como outras validações independentes podem ser realizadas. Os sensores GOSAT, OCO-2 e TROPOMI são normalmente comparados com medidas de XCO₂ e XCH₄ da rede TCCON.

Os trabalhos que validaram concentrações de XCO₂ e XCH₄ do GOSAT, OCO-2, TROPOMI e MERGED que serviram de referência para a comparação desses produtos com as medidas de superfície realizadas na floresta Amazônica estão sumarizados na Tabela 1.1-1.2. Por fim, foram feitas comparações entre as medidas de superfície na Amazônia e as concentrações dos sensores OCO-2, GOSAT, TROPOMI, do produto combinado MERGED e do modelo CAMS.

4.1 Resultados para o sítio ATTO

4.1.1 Aspectos meteorológicos e concentração atmosférica de CO₂ e CH₄ para o sítio ATTO

O padrão de precipitação obtido a partir de medidas do sítio ATTO foi condizente com o padrão climatológico esperado para a Bacia Amazônica Central, em que o maior volume de precipitação em média ocorreu em março com 300 mm e o mínimo em agosto com aproximadamente 50 mm, assim como observado por [Andreae et al. \(2015\)](#) a partir de medidas do sítio ATTO entre 2012 e 2014, e de medidas do Instituto Nacional de

Meteorologia (INMET) para a região de Manaus dentro de um período de referência entre 1961 e 1990.

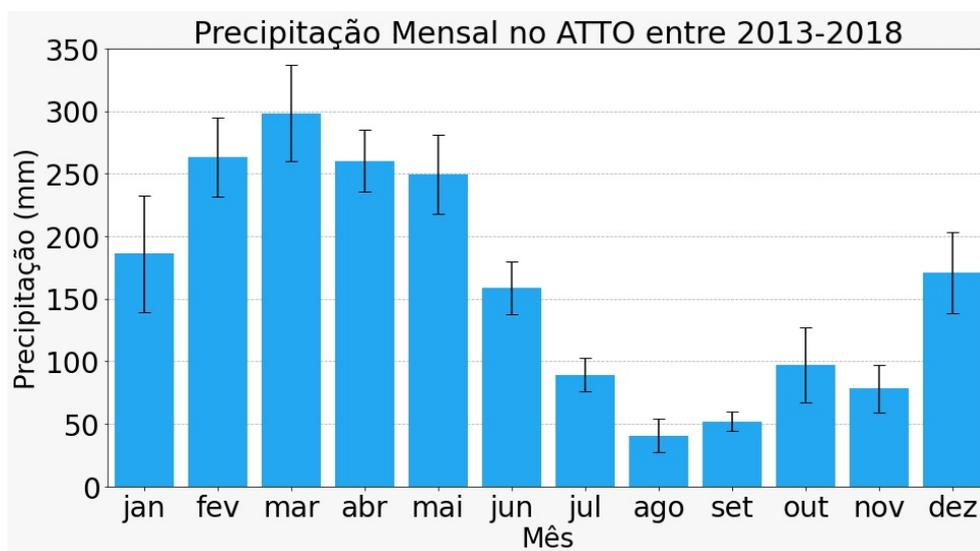


Figura 4.1: Volume médio mensal de precipitação em milímetros para o sítio ATTO, variando entre 300 mm em março e 47 mm em agosto, aproximadamente.

Na Figura 4.1 vemos que o maior volume de chuvas ocorre entre os meses de janeiro e maio, coincidindo com a ocorrência da ZCIT, com a sua passagem, depois de maio há uma diminuição da precipitação na Amazônia, sendo agosto e setembro o período com menor volume de chuva na região. Depois de outubro, junto com a formação da ZCAS, o volume de precipitação volta a aumentar, mesmo padrão de precipitação visto por [Andreae et al. \(2015\)](#); [Botía et al. \(2022\)](#) para a região. Assim, o volume médio de precipitação na região do sítio ATTO (Amazônia Central) foi de 1972 mm, cerca de 15% menos que a média anual para Manaus, o que pode ser resultado da variabilidade interanual da precipitação no sítio ATTO, como mostra [Andreae et al. \(2015\)](#).

O fluxo de radiação também apresentou diferenças entre as estações seca e chuvosa de aproximadamente 80 W/m^2 . Os meses com fluxo de radiação mais baixo ocorreram durante a estação chuvosa, justificado pela maior cobertura de nuvens nessa época, e o contrário foi observado para a estação seca com maior incidência média de radiação solar, sendo setembro o mês de máximo fluxo de radiação incidente médio com mais de 250 W/m^2 , como pode ser visto na Figura 4.2.

Os perfis verticais de CO_2 e de CH_4 ao longo dos níveis da torre de 80 m no sítio ATTO que englobam todos os meses do ano que está representado em preto, os perfis completos, apresentam comportamento semelhante, diminuindo a concentração com altura tanto no caso em que estão apresentadas concentrações medidas em todas as horas do dia, como também no caso do perfil vertical de CO_2 apenas entre 13:00 e 16:00 no horário local.

Durante as estações chuvosa e seca o perfil vertical mantém o mesmo comportamento, mas as concentrações durante a estação chuvosa apresentam concentrações cerca de 4 ppm

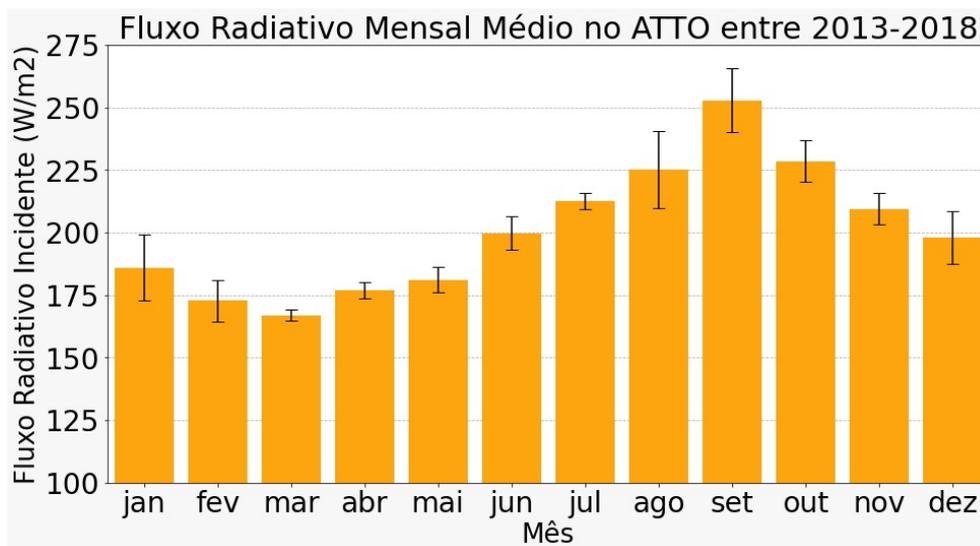


Figura 4.2: Fluxo radiativo incidente médio mensal em W/m^2 para o sítio ATTO, variando aproximadamente entre 165 W/m^2 em março e 250 W/m^2 em setembro.

maiores que na estação seca, o que pode ser devido ao aumento da atividade fotossintética com o fluxo radiativo mais intenso na estação seca e ao aumento da altitude da camada limite planetária em cerca de 500 m em um ano típico (Botía et al., 2022; Carneiro and Fisch, 2020). Além disso, no perfil vertical de concentrações de CO_2 durante o dia (Figura 4.4), observa-se que a concentração em 79 m é maior que em 38 m, onde está o dossel das árvores da floresta, esse resultado também foi verificado por Botía et al. (2022), que conta que isso revela a captura de CO_2 pelo dossel da vegetação durante todo o ano através da fotossíntese.

O perfil vertical de CH_4 durante o dia apresenta concentrações 8 ppb maiores na estação chuvosa que na seca, aproximadamente, mas ambos com o mesmo gradiente negativo de concentração com a altura. Já o perfil vertical que engloba todas as horas do dia apresenta um gradiente positivo, indicando um aumento na concentração de metano durante a noite no topo na torre Botía et al. (2020).

4.1.2 Concentrações de CO_2 e CH_4 para o sítio ATTO

O sítio experimental ATTO possui uma série temporal de 2012 a 2021 com medidas diárias de concentração de CO_2 e de CH_4 com alta precisão, a partir de onde foram obtidos os perfis verticais de CO_2 e CH_4 (Figura 4.3 e 4.4), bem como as séries temporais apresentadas nas Figuras 4.5 e 4.8.

Na Figura 4.5 observa-se a variação do CO_2 atmosférico variou ao longo dos anos, passando de 405 a 425 ppm em nove anos. Com isso, foi obtida uma taxa de crescimento de CO_2 de $2,36 \pm 0,07 \text{ ppm ano}^{-1}$, sendo esse resultado semelhante à taxa de crescimento média global relatada pelo 5º relatório do IPCC como $2,39 \pm 0,37 \text{ ppm ano}^{-1}$ entre 2010-2019. Botía et al. (2022) também calculou a taxa de crescimento média da concentração

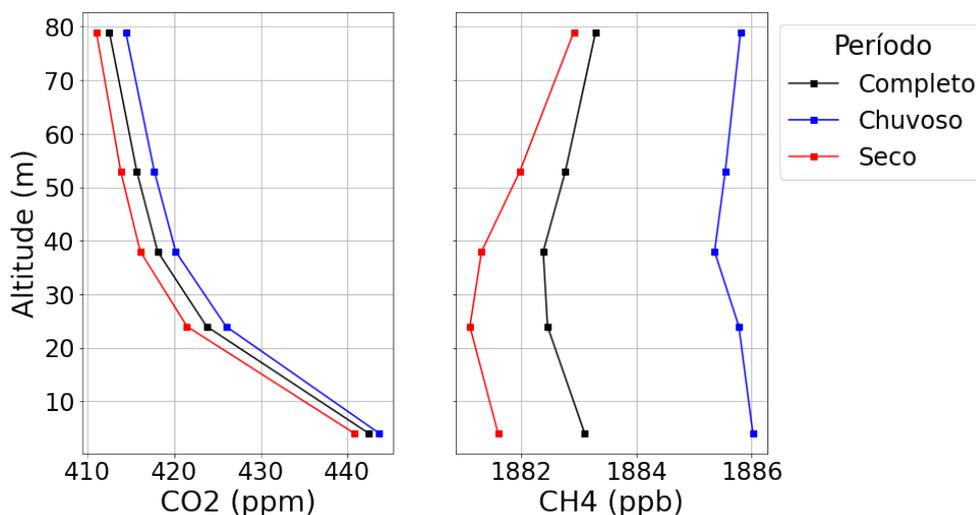


Figura 4.3: Perfil vertical de CO₂ e CH₄ ao longo dos 5 níveis da torre de 80 m no sítio ATTO, durante todas as horas do dia. À esquerda estão os perfis de CO₂ e à direita os de CH₄. O perfil vertical em azul representa as concentrações durante a estação chuvosa, em vermelho apenas durante a estação seca e o em preto é o completo com todos os meses do ano.

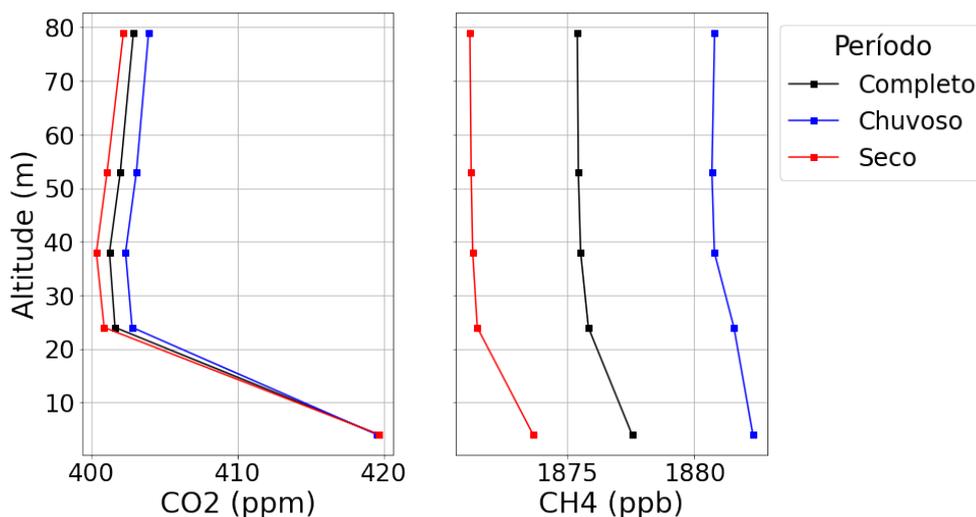


Figura 4.4: Perfil vertical de CO₂ e CH₄ ao longo dos 5 níveis da torre de 80 m no sítio ATTO entre 13:00 e 16:00. À esquerda estão os perfis de CO₂ e à direita os de CH₄. O perfil vertical em azul representa as concentrações durante a estação chuvosa, em vermelho apenas durante a estação seca e o em preto é o completo com todos os meses do ano.

de CO₂ utilizando medidas realizadas no sítio ATTO entre 2014 e 2020 e obteve uma taxa de $2,49 \pm 0,08$ ppm ano⁻¹.

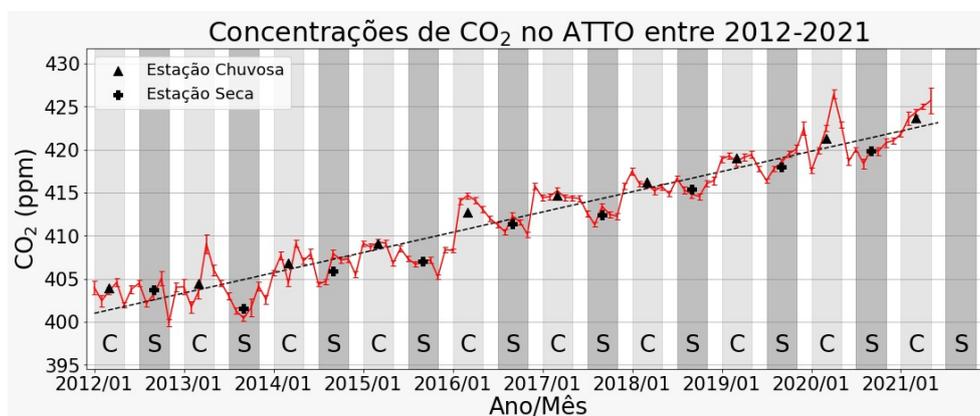


Figura 4.5: Concentração média mensal de CO₂ no sítio ATTO para o intervalo de 2012-2021. A reta tracejada representa o melhor ajuste linear médio para os valores mensais. As cruzes e os triângulos pretos representam as médias das estações secas (S) e chuvosas (C), que estão demarcadas pelas áreas em cinza.

Como a taxa de crescimento de CO₂ atmosférico obtida a partir das medidas do ATTO correspondem à taxa de crescimento global, ela foi utilizada para determinar o valor médio mensal de fundo de CO₂. A fim de analisar a anomalia das concentrações locais de CO₂ ao longo dos anos, o valor da tendência média de crescimento de CO₂ foi subtraído da média mensal observada (Δ CO₂), cujos resultados podem ser vistos em Figura 4.6. Dessa forma, as concentrações de CO₂ foram maiores durante a estação chuvosa (janeiro-abril) e menores nas estações secas (julho-outubro), variando em média 2,63 ppm entre elas. De modo que as concentrações de CO₂ são menores na estação seca por causa do limite da camada de mistura que é aproximadamente 200 m mais alto nessa estação que na chuvosa [Botía et al. \(2022\)](#) e pela maior absorção de dióxido de carbono pela vegetação devido ao maior fluxo radiativo incidente nesse período, não sendo possível saber ainda qual das duas componentes é predominante.

No ciclo diurno do CO₂ na Figura 4.7, observa-se que as menores concentrações de CO₂ ocorrem por volta de 12:00 no horário local e que após o pôr do sol existe um aumento na concentração de CO₂, atingindo o seu máximo entre 6:00 e 7:00 no horário local. A partir das 10:00 as concentrações apresentam pouca variação entre os valores de concentração nas estações seca e chuvosa, de aproximadamente (\sim 1 ppm). Porém, durante a noite e nas primeiras horas da manhã as concentrações variam cerca de 5 ppm entre as estações chuvosa e seca. A amplitude da concentração de CO₂ durante cada estação foi de aproximadamente 30 e 26 ppm nas estações chuvosa e seca, respectivamente.

Dessa forma, é possível perceber claramente mais uma vez a influência da fotossíntese como importante mecanismo de controle da concentração de CO₂ na Amazônia Central, pois é por causa dela que as mínimas concentrações de CO₂ ocorrem entre 13:00 e 16:00

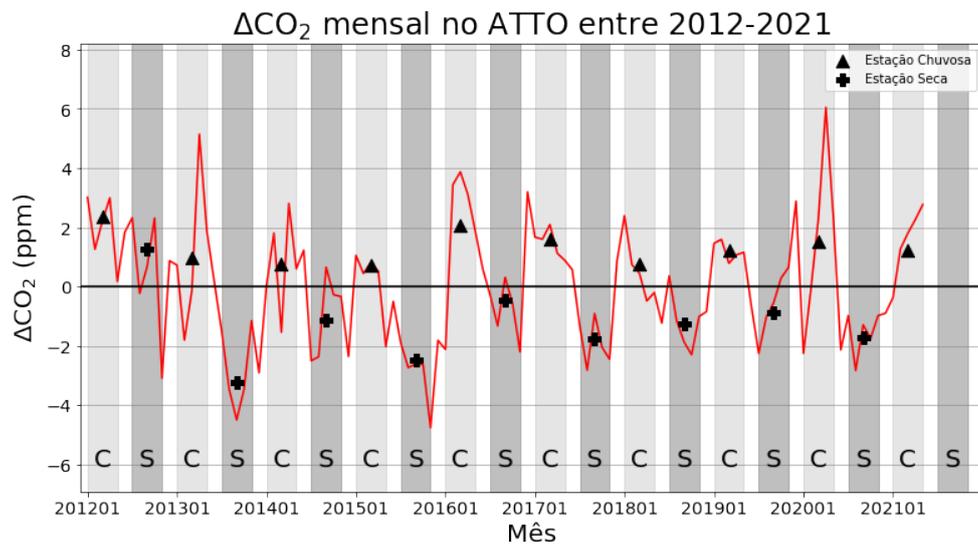


Figura 4.6: Concentração média mensal de CO₂ no sítio ATTO para o intervalo de 2012-2021 dessazonalizada. As cruzes e os triângulos pretos representam as médias das estações secas (S) e chuvosas (C), respectivamente, que estão demarcadas pelas áreas em cinza.

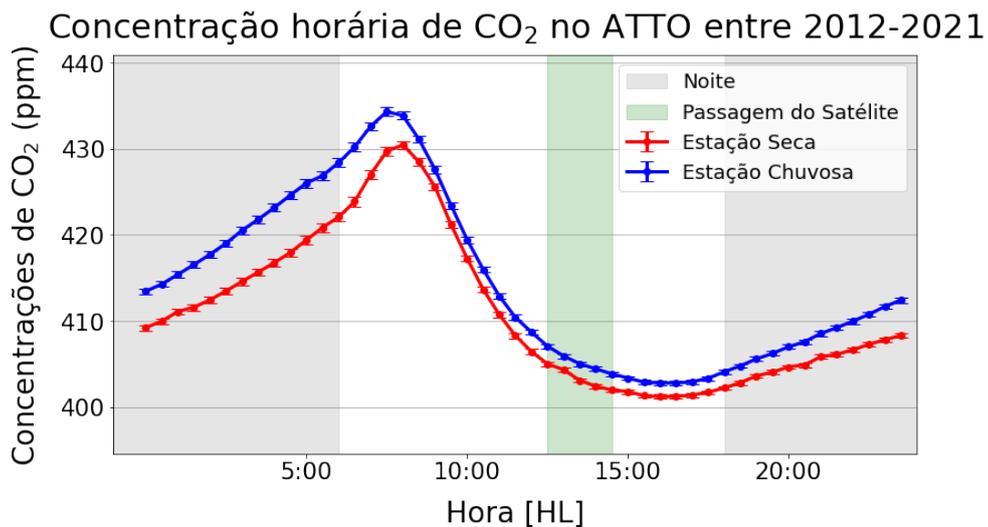


Figura 4.7: Ciclo diurno do CO₂ no sítio ATTO. As linhas representam as médias horárias entre os anos de 2012 e 2020 para as estações secas e chuvosas. As áreas cinzas marcam o período da noite no local, enquanto a área verde marca o horário de passagem do satélite.

no horário local.

Para o metano na região do sítio ATTO (Amazônia Central), a taxa de crescimento anual entre 2014 e 2019 foi de $6,35 \pm 0,24$ ppb ano⁻¹, como pode ser vista na Figura 4.8, e é semelhante a reportada pelo IPCC de 7 ± 3 ppb ano⁻¹ entre 2007-2016. Basso et al. (2021) também encontrou taxa de crescimento de metano parecida ao analisar concentrações de metano sobre Santarém a partir de medidas de avião entre 2010 e 2018, que foi $7,9 \pm 1,1$ ppb ano⁻¹.

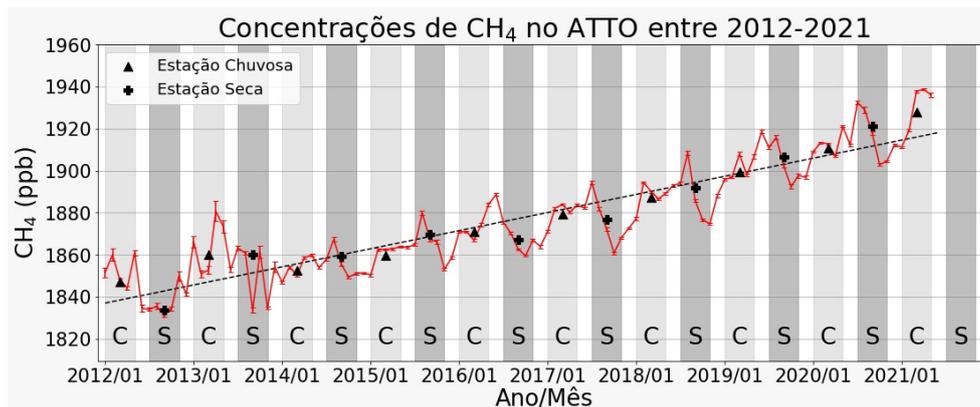


Figura 4.8: Concentração média mensal de CH₄ no sítio ATTO para o intervalo de 2012-2021. A reta tracejada representa o melhor ajuste linear médio para os valores mensais. As cruces e os triângulos pretos representam as médias das estações secas (S) e chuvosas (C), que estão demarcadas pelas áreas em cinza.

Analisando ΔCH_4 , entre 2012 e 2013 a concentração média foi maior na estação chuvosa, que é período com maior volume de chuvas e pode estar associado a emissões pelas planícies alagadas da Bacia Amazônica. Porém, para durante os outros anos não é nítido em quais período as concentrações médias são maiores. Mesmo assim, a diferença entre as concentrações médias nas estações chuvosa e seca no período analisado como um todo foi de $7,30 \pm 1,66$ ppb. Esse resultado pode estar relacionado com o aumento da altura da camada limite planetária durante a estação seca, causando uma maior diluição do gás na atmosfera Botía et al. (2020) (Figura 4.9).

O ciclo diurno de metano apresenta concentrações maiores durante a noite e nas primeiras horas da manhã do que no resto do dia. Durante a noite e as primeiras horas da manhã as concentrações variam pouco entre as estações, cerca de 4 ppb. Porém, após às 10h da manhã as concentrações diminuem em ambas as estações e os valores chegam a diferir 10 ppb uma da outra. Além disso, a amplitude das concentrações de metano nas estações seca e chuvosa foram de aproximadamente 20 e 13 ppb, respectivamente. Analisando o perfil vertical durante o dia para o metano na Figura 4.4 vemos que as concentrações na estação seca são sempre menores que na estação chuvosa.

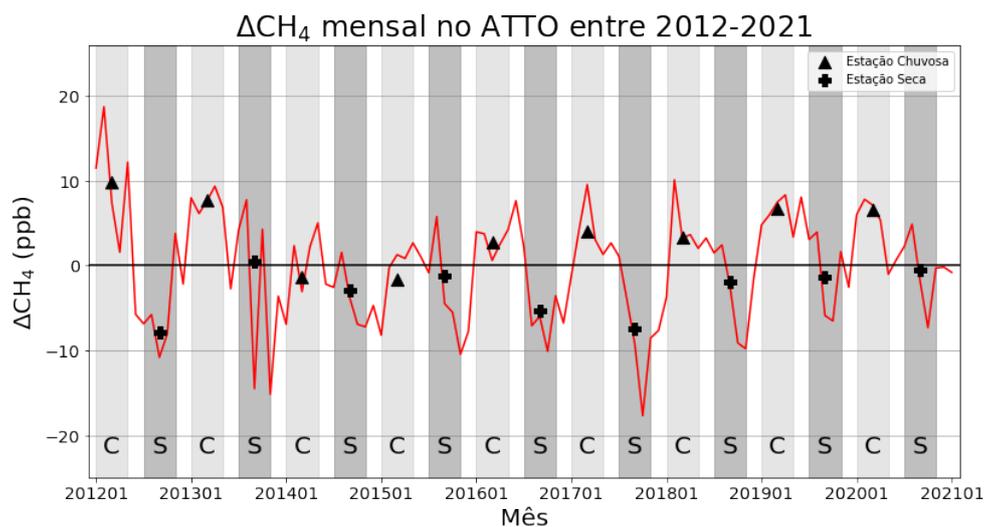


Figura 4.9: Concentração média mensal de CH_4 no sítio ATTO para o intervalo de 2012-2021 dessazonalizada. As cruzeiros e os triângulos pretos representam as médias das estações secas (S) e chuvosas (C), respectivamente, que estão demarcadas pelas áreas em cinza.

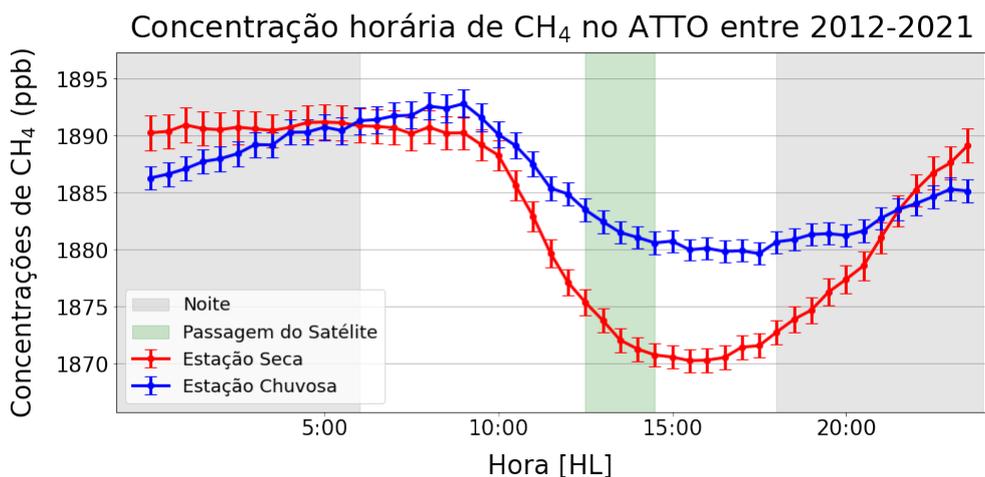


Figura 4.10: Ciclo diurno de CH_4 no sítio ATTO. As linhas representam as médias horárias entre os anos de 2012 e 2020 para as estações secas e chuvosas. As áreas cinzas marcam o período da noite no local, enquanto a área verde marca o horário de passagem do satélite.

4.2 Resultados em K67/SAN

4.2.1 Aspectos meteorológicos e concentração atmosférica de CO_2 e CH_4 em K67/SAN

A torre de fluxos do Km 67 está situada na região leste da floresta Amazônica dentro da reserva do Tapajós em Santarém, e tem em seus limites o rio Tapajós à oeste a 6 km de distância e a BR-163 à leste também a 6 km de distância, que é uma região explorada pela agricultura [Hutyra et al. \(2007\)](#). Apresenta um padrão mais seco em relação às chuvas quando comparada com o nível de precipitação na Amazônia Central, como visto pelas

medidas de precipitação no sítio ATTO.

As condições de precipitação e temperatura médias anuais obtidas a partir das medidas realizadas em K67/SAN foram $1095,24 \text{ mm ano}^{-1}$ e $26,6 \text{ }^\circ\text{C}$ e estão dentro do esperado para a região Pyle et al. (2008). O comportamento sazonal da precipitação ao longo dos meses dos anos de 2002 a 2019 em K67/SAN apresentou maior volume de chuva entre janeiro e maio, com máximo em abril, mas não chegou a 200 mm. Entre junho e dezembro ocorreram os meses com menor volume de precipitação ($< 100 \text{ mm}$), com volume de precipitação mínimo em agosto, como pode ser visto em Figura 4.11.

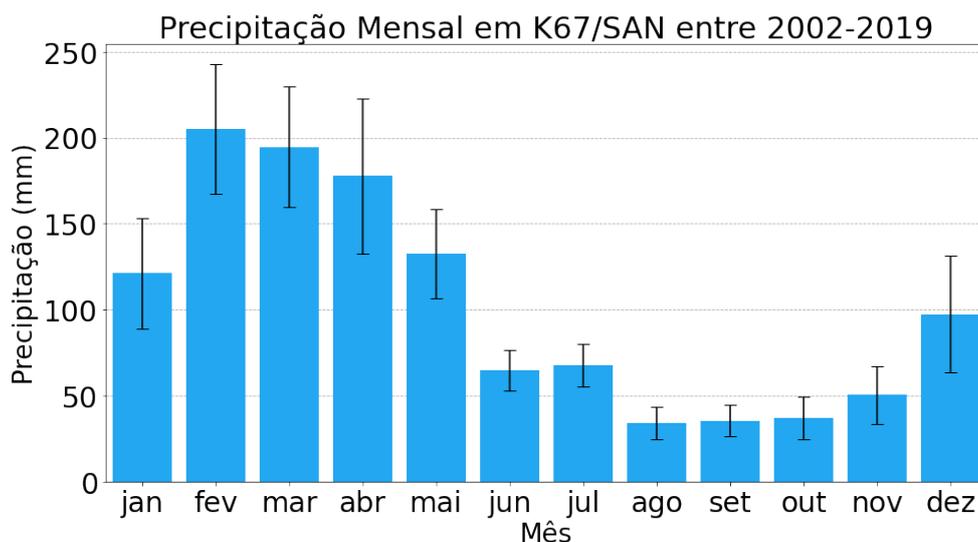


Figura 4.11: Volume médio mensal de precipitação em milímetros para Santarém, variando entre 160 mm em abril e 25 mm em setembro, aproximadamente.

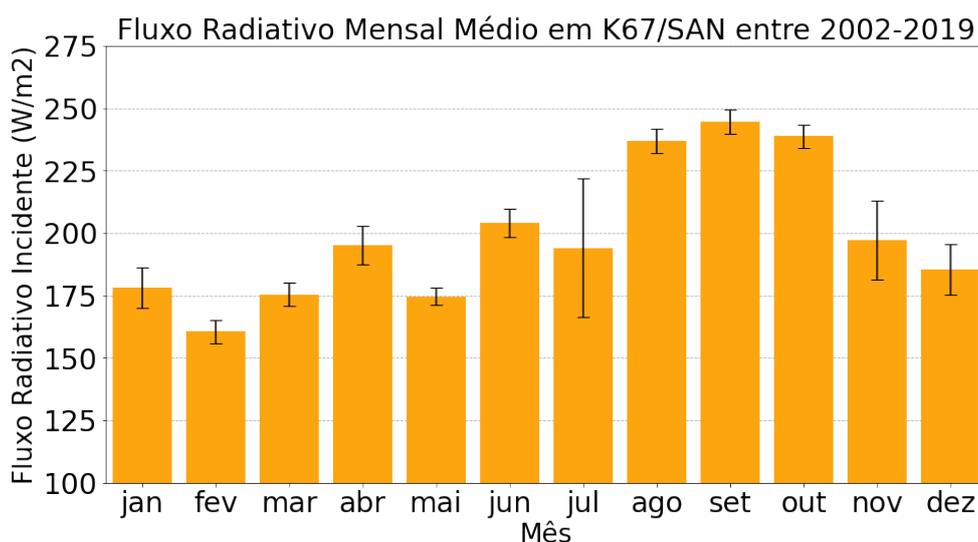


Figura 4.12: Fluxo radiativo incidente médio mensal em W/m^2 para Santarém, variando entre 160 W/m^2 em março e 240 W/m^2 em setembro, aproximadamente.

O perfil vertical de CO_2 em K67/SAN apresenta concentrações maiores nos primeiros

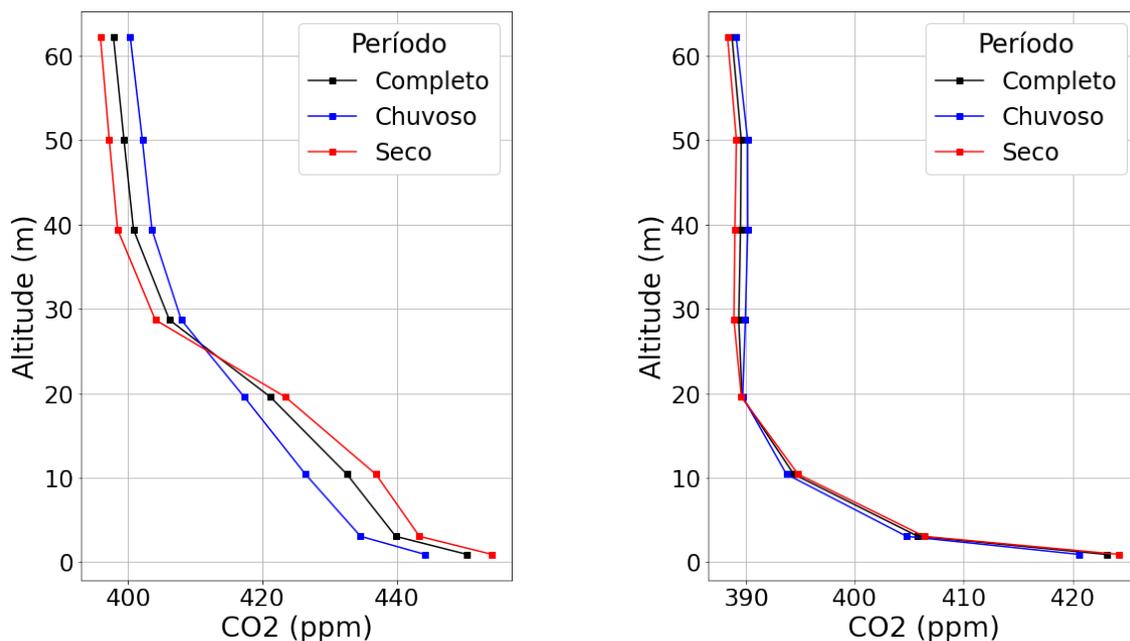


Figura 4.13: Perfil vertical de CO₂ dos 8 níveis da torre de fluxo K67 em Santarém, durante todas as horas do dia à esquerda e entre as 13:00 e 16:00, no horário local, à direita. O perfil vertical em azul representa as concentrações durante a estação chuvosa, em vermelho apenas durante a estação seca e o em preto é o completo com todos os meses do ano. O perfil vertical em azul representa as concentrações durante a estação chuvosa, em vermelho apenas durante a estação seca e o em preto é o completo com todos os meses do ano.

metros, ainda dentro do dossel, variando de 450 ppm na superfície a 408 ppm próximo a 30 m, nas estações seca e chuvosa. Essa redução além de ser devido diluição do gás com a altitude, existe o papel da fotossíntese e sabe-se que em média o dossel das árvores nessa região fica a aproximadamente 40 m de altura [Hutyra et al. \(2007\)](#). Dessa forma, as concentrações durante a estação seca foram cerca de 10 ppm maiores próximas à superfície, mas em 30 m ocorreu uma inversão e passaram a ser 4 ppm maiores na estação chuvosa. Observando o perfil vertical apenas durante o dia as concentrações são as mesmas em ambas as estações, variando apenas com a altitude. Esse comportamento pode indicar que durante o dia a altura da camada limite planetária influencia menos nas concentrações ao longo do perfil vertical em Santarém que no ATTO, e que pode ser a fotossíntese o principal mecanismo de redução da concentração de CO₂. Os perfis verticais das concentrações de CO₂ em K67/SAN podem ser vistos na Figura 4.13.

4.2.2 Concentrações de CO₂ para o sítio K67/SAN

As medidas de CO₂ atmosférico realizadas no sítio K67/SAN de 2002 a 2019 estão representadas na Figura 4.14 com as concentrações médias mensais no período. Com isso, a taxa de crescimento anual de CO₂ atmosférico obtida foi de $2,60 \pm 0,07$ ppm ano⁻¹, também similar ao valor reportado pelo 5º relatório do IPCC ([Ciais et al., 2013](#)).

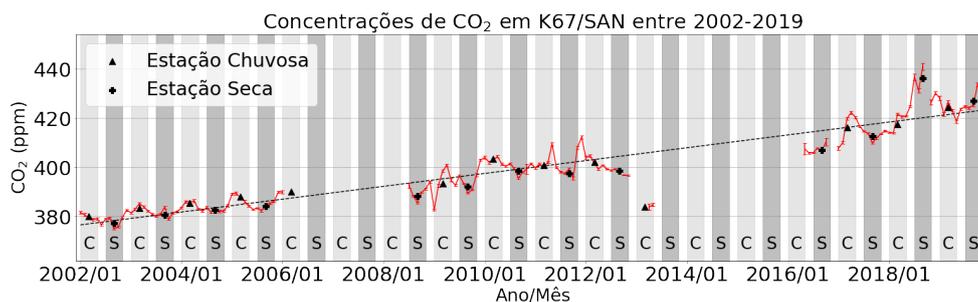


Figura 4.14: Concentração média mensal de CO₂ em Santarém para o intervalo de 2002-2019. A reta tracejada representa o melhor ajuste linear para os valores mensais. As cruces e os triângulos pretos representam as médias das estações secas (S) e chuvosas (C), que estão demarcadas pelas áreas em cinza.

Analisando ΔCO_2 vemos na Figura 4.15 que nos primeiros anos de medições entre 2002 e 2006 as concentrações máximas ocorreram durante a estação chuvosa e as mínimas na estação seca. Entre 2006 e 2009 não temos informações, mas a partir de 2009 o comportamento de máximas concentrações na estação chuvosa e mínimas na estação seca se mantém até 2016 quando inicia um período de um ano sem informações. Em 2017 ocorre o mesmo comportamento de máximos e mínimos, porém entre o fim da estação chuvosa de 2018 e início da estação seca parece acontecer uma inversão, de modo que encontramos um máximo na concentração de CO₂ na estação seca de 2019 seguido por um declínio na estação chuvosa. De modo que a variação média das concentrações CO₂ entre as estações chuvosa e seca foi de $1,92 \pm 1,86$ ppm.

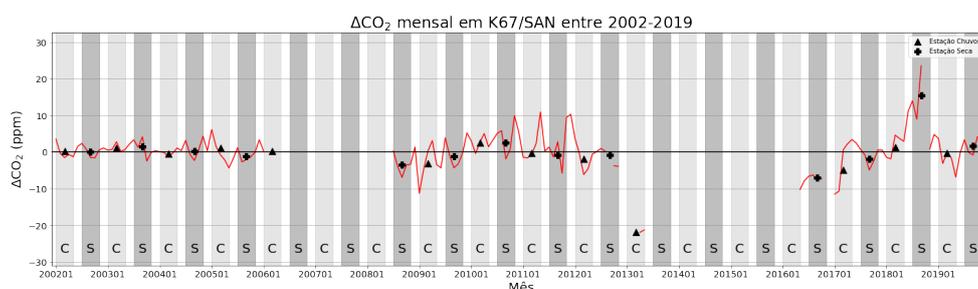


Figura 4.15: Concentração média mensal de CO₂ em Santarém para o intervalo de 2002-2019 dessazonalizada. As cruces e os triângulos pretos representam as médias das estações secas (S) e chuvosas (C), respectivamente, que estão demarcadas pelas áreas em cinza.

A mudança do padrão de concentrações pode ser explicada pelo aumento da intensidade de queimadas na região, já que a região à leste de K67/SAN é marcada pela agricultura que é o fator dominante para as queimadas na Amazônia brasileira [Silveira et al. \(2022\)](#). Mas essa é uma hipótese que será investigada comparando-se as medidas de concentrações de CO₂ com a intensidade de queimadas.

Durante o ciclo de diurno do CO₂ em Santarém as concentrações variaram cerca 27 ppm na estação chuvosa e de 19 ppm da estação seca, como pode ser visto na Figura 4.16.

Aqui também é possível observar a influência da fotossíntese, pois além das concentrações mínimas nas duas estações ocorrerem entre o meio-dia e o pôr do sol, elas foram semelhantes em ambas as estações nesse período do dia.

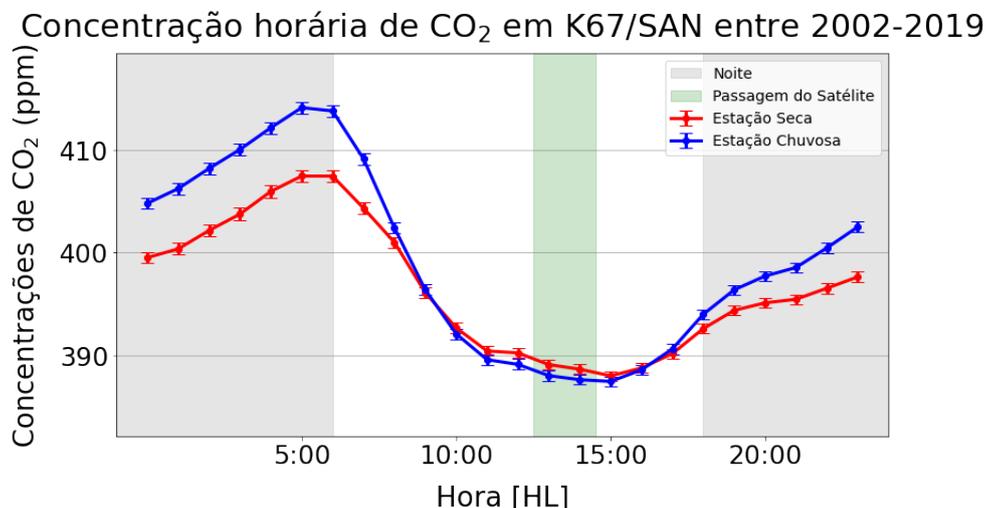


Figura 4.16: Ciclo diurno do CO₂ no sítio K67/SAN. As linhas representam as médias horárias entre os anos de 2002 e 2019 para as estações secas e chuvosas. As áreas cinzas marcam o período da noite no local, enquanto a área verde marca o horário de passagem do satélite.

4.3 Critério de colocação das medidas de superfície e dos dados de sensoriamento remoto

Utilizando o critério de colocação espacial descrito na metodologia para os produtos de CO₂ e CH₄ dos satélites utilizados, foram obtidos os correlogramas das Figuras 4.17-4.19. No eixo horizontal estão diferentes raios de distância em quilômetros em torno da medida de superfície e o no eixo vertical estão os valores de correlação Pearson (r) calculados entre as medidas de satélite a um certo raio de distância do sítio experimental e as medidas de superfície temporalmente ajustadas ao horário de passagem dos instrumentos (± 1 hora em relação ao horário de passagem do satélite).

Dessa forma, os raios de influência para as medidas de cada um dos produtos em relação à superfície foram delimitados onde os valores das correlações foram constantes, representando a correlação entre os valores médios globais da concentração de CO₂ atmosférico medidos pelos sensores e nas torres.

A Figura 4.17 apresenta os correlogramas entre as medidas de CO₂ do sítio ATTO e os produtos de satélite. Assim, o maior valor de correlação obtido foi de aproximadamente 0,9 para o sensor OCO-2 a 80 km do sítio experimental ATTO, mas é possível que essa correlação seja devido a aleatoriedades numéricas, por causa do número de medidas

utilizadas nesse cálculo, apenas 21. Posteriormente o valor da correlação caiu para 0,7 e permaneceu constante, sendo 270 km o raio de influência considerado para o produto do sensor OCO-2, obtido com 149 medidas.

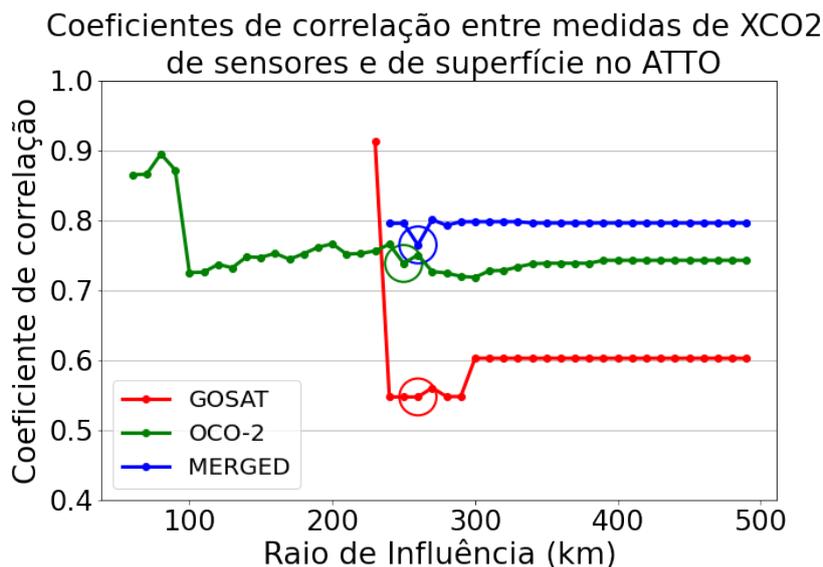


Figura 4.17: Correlograma com os coeficientes de correlação obtidos entre as medidas de superfície e dos produtos de satélite colocalizados em diferentes raios em torno da posição da medida de superfície. O correlograma entre as medidas do OCO-2 e as de superfície no sítio ATTO está representado em verde, o correlograma entre o GOSAT de XCO₂ e as medidas no sítio ATTO estão em vermelho, e o entre o produto MERGED de XCO₂ e as medidas de superfície em azul. Os círculos marcam os raios de influência determinados para cada um dos produtos.

A correlação entre as medidas do GOSAT apresentou um pico no valor da correlação em um raio de 230 km, obtido com apenas 6 medidas, levando a não ser considerado como um possível raio de influência para as medidas do produto do GOSAT.

Em 270 km, aproximadamente, o valor da correlação entre as medidas do GOSAT e as de superfície passou a ser constante de cerca de 0,6. Similarmente, as medidas do produto MERGED em relação às de superfície começaram a apresentar valores de correlação constantes de cerca de 0,8 em torno de 270 km, obtido com 27 medidas. O raio de influência das medidas do produto MERGED foi mantido em 270 km pois o número máximo de medidas possível foi 30 em com 500 km de raio.

Nos correlogramas para as medidas de metano dos sensores em relação as medidas do sítio ATTO na Figura 4.18, vemos que existem dois picos antes do valor da correlação se tornar constante. O primeiro, em 90 km, não foi considerado como possível raio de influência por causa do número reduzido de medidas utilizadas no cálculo da correlação, contando apenas com 9 medidas.

Porém, em 270 km o valor da correlação passou a ser constante em 0,4, obtido a partir de um conjunto de 56 medidas. Assim o raio de influência para do TROPOMI em torno do sítio ATTO foi delimitado em 270 km. Similarmente, os raios de influência para os

produtos de XCH_4 do GOSAT e do MERGED também foram delimitados em 270 km, em que as correlações entre as suas medidas e as de superfície foram sempre constantes e em torno de 0,6 e 0,7, respectivamente.

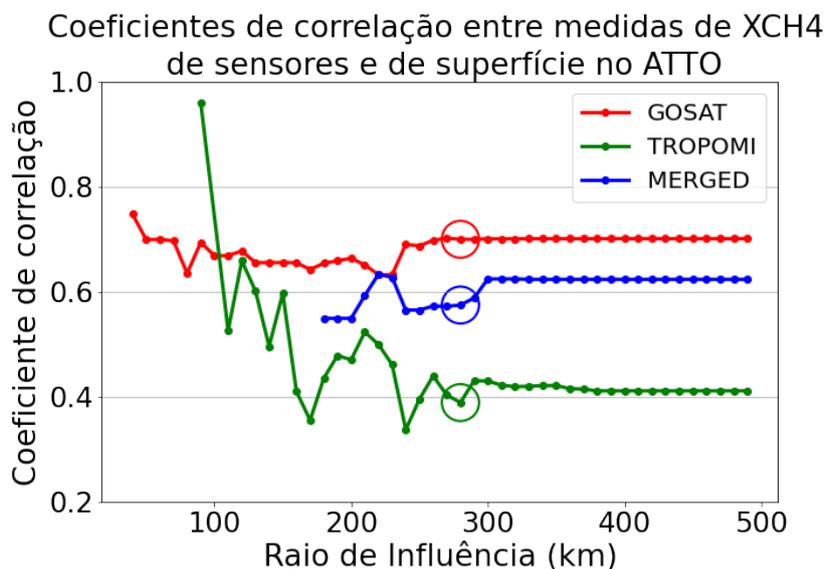


Figura 4.18: Correlograma com os coeficientes de correlação obtidos entre as medidas de superfície e dos produtos de satélite colocalizados em diferentes raios em torno da posição da medida de superfície. O correlograma entre as medidas do TROPOMI e as de superfície no sítio ATTO está representado em verde, o correlograma entre o GOSAT de XCH_4 e as medidas no sítio ATTO estão em vermelho, e o entre o produto MERGED de XCH_4 e as medidas de superfície em azul. Os círculos marcam os raios de influência determinados para cada um dos produtos.

Para o caso das correlações entre as medidas de XCO_2 dos sensores e as medidas de superfície em K67/SAN, o comportamento é semelhante ao encontrado para o ATTO, pois apenas para o OCO-2 foi encontrado um pico no gráfico da correlação possivelmente devido à aleatoriedade numérica, mas em 170 km o coeficiente de correlação é constante e de 0,4. Para o GOSAT e o MERGED de XCO_2 o raio de influência também foi delimitado em 170 km, em que as correlações entre elas e as medidas de superfície foram 0,8 e 0,9, respectivamente.

Logo, é possível considerar raios de influência ainda maiores para os produtos de XCO_2 e XCH_4 contanto que estejam dentro do *footprint* das massas de ar que chegam até os sítios experimentais. Assim como fez Taylor et al. (2021) que ao colocalizar medidas de XCO_2 do sensor GOSAT em relação aos sítios TCCON em 25°S aumentou a área de influência de 2,5° de latitude e 5° de longitude para aproximadamente 10° de latitude e 20° de longitude, a fim de aumentar o número de medidas em sua análise.

Assim, apenas medidas dentro de seu respectivo raio de influência em torno da medida de superfície foram utilizadas nos cálculos de bias e RMSE como forma de avaliar a exatidão e a precisão entre as medidas de satélite com relação as de superfície.

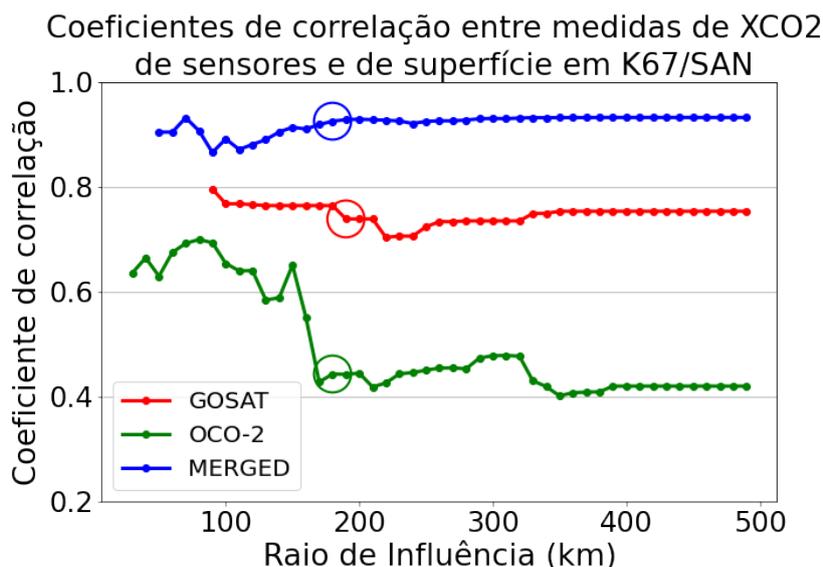


Figura 4.19: Correlograma com os coeficientes de correlação obtidos entre as medidas de superfície e dos produtos de satélite colocalizados em diferentes raios em torno da posição da medida de superfície. O correlograma entre as medidas do OCO-2 e as de superfície em Santarém está representado em verde, o correlograma entre o GOSAT de XCO₂ e as medidas de superfície em Santarém está em vermelho, e o entre o produto MERGED de XCO₂ e as medidas de superfície em azul. Os círculos marcam os raios de influência determinados para cada um dos produtos.

4.4 Resultados da validação

4.4.1 Comparação entre medidas de produtos de XCO₂ e XCH₄ de satélites e medidas de superfície na Amazônia

4.4.1.1 Número de medidas fornecidas pelos produtos de satélite para os sítios ATTO e K67/SAN

Uma vez determinados os raios de influência em torno das medidas de superfície foram obtidos os valores de bias e erro médio quadrático entre elas, além do número de medidas totais e de dias distintos em que elas ocorreram no período entre 2012-2021 para o sítio ATTO e entre 2002-2019 para o sítio K67/SAN, como pode ser visualizado na Tabela 4.1-4.3.

Comparando o número de medidas de concentração de XCO₂ dos sensores com as do sítio ATTO, o instrumento com o maior número de medidas foi o OCO-2 com 8155 em 149 dias distintos dentro do raio de influência de 270 km. O produto MERGED apresentou 59 medidas em 33 dias diferentes e o GOSAT teve 52 medidas em 27 dias.

De maneira semelhante, em K67/SAN o instrumento com maior número de medidas foi o OCO-2 com 4046 medidas em 54 dias diferentes dentro do raio de 170 km entre 2014-2019. Apesar de K67/SAN ter dois anos a menos de medidas do OCO-2 que o

sítio ATTO, foi obtido um número de medidas absolutas seis vezes maior. O melhor desempenho do sensor OCO-2 nesse sítio pode ser associado à menor cobertura de nuvens na região leste onde está Santarém que na parte central da Amazônia, onde está o sítio ATTO. O produto MERGED de XCO₂ sobre K67/SAN apresentou 162 medidas em 42 dias e o produto do GOSAT apresentou 80 medidas em 32 dias distintos.

De modo geral, levando em conta a escala temporal dos três produtos todos forneceram um número reduzido de medidas para as concentrações de XCO₂ sobre a região Amazônica, como observado também por [Hakkarainen et al. \(2019\)](#) que justificou a falta de medidas sobre regiões como a Amazônia, África central, China e Himalaia devido à alta cobertura de nuvens e/ou de aerossóis atmosféricos nesses locais. Entretanto, dentro dessas condições e relativo ao número de medidas, o OCO-2 foi o sensor com melhor desempenho na medição de CO₂, e isso se deve a sua maior resolução espacial comparada a do GOSAT e por realizar medidas com mais repetições [Liang et al. \(2017\)](#).

O produto de XCH₄ com maior número de medidas sobre a região do sítio ATTO dentro do raio de influência de 270 km foi o TROPOMI com 2477 medidas em 3 anos (2018-2021), seguido do GOSAT com 1077, de modo para o GOSAT elas ocorrem em mais dias distintos que o TROPOMI. E o produto MERGED obteve 294 medidas em 75 dias. Aqui mais uma vez é possível observar a dificuldade na obtenção de medidas na região dos trópicos ([Hu et al., 2018](#)), em que os sensores TROPOMI e GOSAT conseguiram medidas satisfatórias em apenas 5% e 9% dos dias em suas séries temporais, respectivamente.

4.4.1.2 Valores de bias e RMSE entre os produtos de satélite para os sítios ATTO e K67/SAN

Foram calculadas as diferenças entre as médias das medidas dos diferentes produtos de satélite e as medidas de superfície realizadas nos sítios ATTO e K67/SAN, bem como a precisão entre elas como descrito em seção 3.6, dadas pelas Equações 3.4 e 3.5. Nas Tabelas 4.1-4.3 pode ser encontrado um resumo com os resultados obtidos para os raios de influência, valor do coeficiente de correlação de Pearson, bias e erro entre as medidas dos produtos de satélite e as de superfície realizadas na Amazônia, além do número de medidas e de dias em que elas ocorreram.

Dentro de um raio de influência de 270 km a diferença entre a média das medidas de XCO₂ do OCO-2 foi de $0,1 \pm 1,1$ ppm e erro de $3,7 \pm 0,2$ ppm. Os valores de bias e erro obtidos entre as medidas de XCO₂ do GOSAT com relação às medidas de superfície do sítio ATTO foram $-2,5 \pm 2,1$ ppm e $5,6 \pm 0,8$ ppm, respectivamente. O produto MERGED teve um bias de $-0,2 \pm 1,8$ ppm e desvio padrão de $3,9 \pm 0,5$ ppm em relação às medidas de superfície do sítio ATTO. A comparação entre as medidas de superfície e os valores das concentrações obtidas pelo modelo CAMS de CO₂ resultou em um bias de $-7,5 \pm 1,0$ ppm e em um erro de $9,0 \pm 0,1$ ppm.

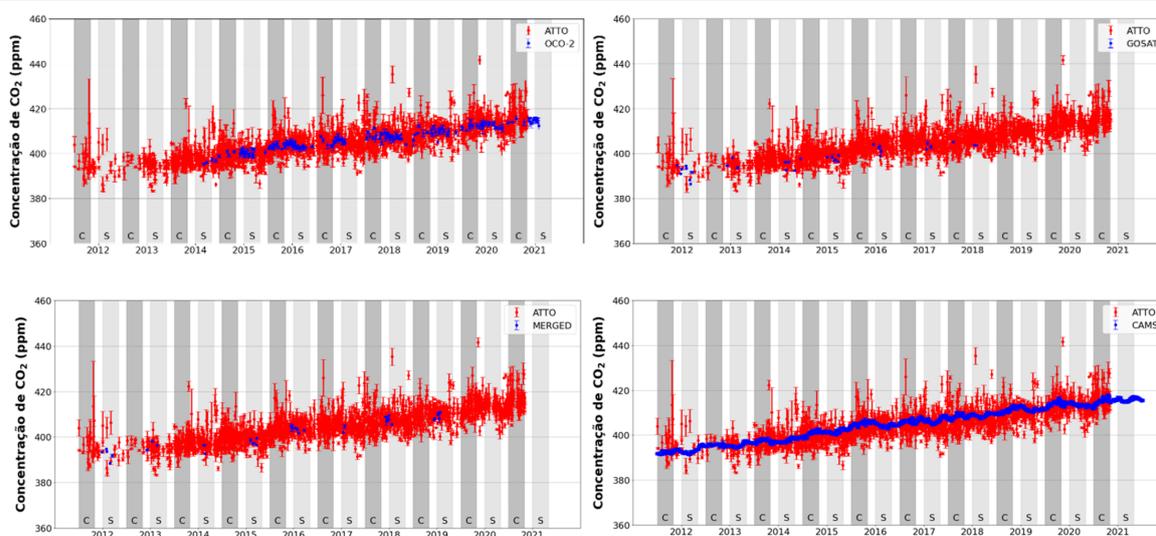
Concentrações CO₂ dos produtos de satélite e no sítio ATTO

Figura 4.20: Concentrações médias de CO₂ no sítio ATTO entre 2012-2020 em vermelho comparadas com medidas dos produtos OCO-2, GOSAT, MERGED e CAMS de XCO₂ dentro do raio de influência de 270 km em torno da torre. As áreas em cinza marcam as estações seca (S) e chuvosa (C).

Tabela 4.1: Resultados da comparação entre os produtos de XCO₂ com as medidas de superfície no sítio ATTO.

Sensor	OCO-2	GOSAT	MERGED	CAMS
RI (km)	270	270	270	-
Coef. correlação	0,7	0,6	0,8	0,8
Nº Medidas	8155	52	59	29224
Nº Dias	149	27	33	2614
Bias (ppm)	0,1 ± 1,1	-2,5 ± 2,1	-0,2 ± 1,8	-7,5 ± 1,0
Bias (%)	0,02 ± 0,26	0,60 ± 0,50	0,05 ± 0,43	1,6 ± 0,2
Erro (ppm)	3,7 ± 0,2	5,6 ± 0,8	3,9 ± 0,5	9,0 ± 0,1
Erro (%)	0,88 ± 0,05	1,33 ± 0,19	0,93 ± 0,12	1,96 ± 0,02
Int. de confiança do bias (ppm)	[-0,5; 5,4]	[-12; 0,99]	[-2,8; 3,2]	[-1,1; -0,3]

Os valores de bias e desvio padrão obtidos entre as medidas de superfície em K67/SAN e as medidas de XCO₂ do OCO-2 em um raio de 170 km foram de $-4,3 \pm 1,1$ ppm e erro $11,7 \pm 1,1$ ppm, respectivamente. O valor de bias entre as medidas do GOSAT foi $-5,2 \pm 2,0$ ppm e o desvio das medidas em relação as de superfície foi de $8,0 \pm 1,0$ ppm. Para o produto MERGED de XCO₂ com o mesmo raio de influência, o bias calculado foi de $-1,3 \pm 2,1$ ppm com erro de $7,0 \pm 0,8$ ppm em relação as medidas de superfície em Santarém. O

bias entre as medidas do modelo CAMS e as medidas de K67/SAN foi de $10,6 \pm 1,0$ ppm com erro de $13,5 \pm 0,2$ ppm.

Concentrações CO₂ dos produtos de satélite e no sítio K67/SAN

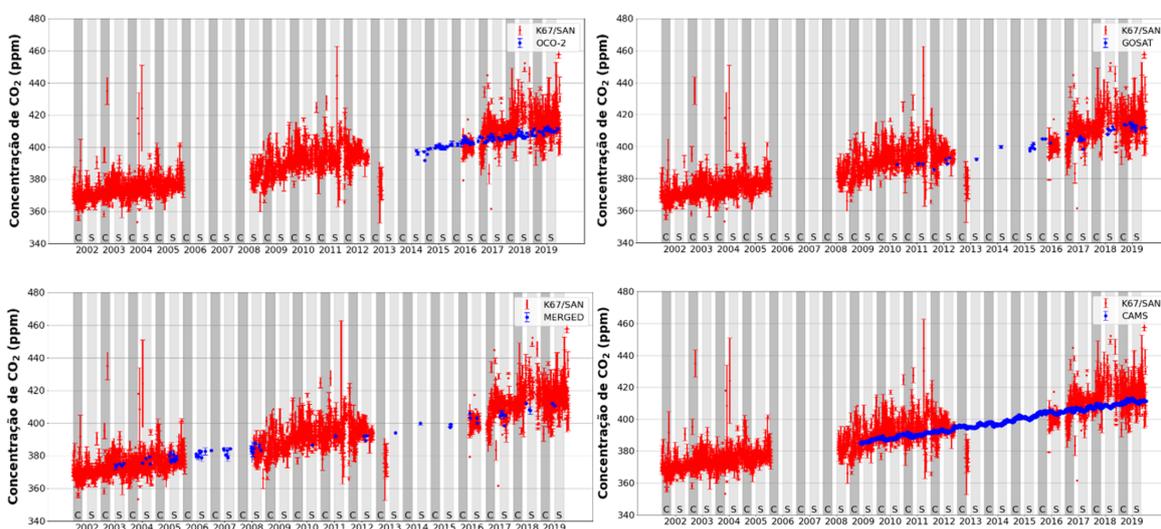


Figura 4.21: Concentrações médias de CO₂ em K67/SAN entre 2002-2019 em vermelho comparadas com medidas dos produtos OCO-2, GOSAT, MERGED e CAMS de XCO₂ dentro do raio de influência 170 km em torno da torre. As áreas em cinza marcam as estações seca (S) e chuvosa (C).

Taylor et al. (2021), analisou a décima versão do produto de XCO₂ do OCO-2 ao comparar as medidas desse sensor sobre o continente com outras realizadas em superfície na rede TCCON e encontrou um bias médio de 0,06 ppm com precisão de 1 ppm. Liang et al. (2017) obteve um bias de aproximadamente 0,27 ppm e desvio padrão de 1,56 ppm, similar ao resultado encontrado por Wunch et al. (2017) que comparou medidas do OCO-2. Além disso, Wunch et al. (2017) também percebeu a interferência do albedo de superfície nos valores de bias e erro que ele obteve para cada sítio, como foi o caso de Bialystok que está numa região de floresta, cujo albedo é baixo e por isso apresentou bias de aproximadamente 1 ppm.

Tabela 4.2: Resultados da comparação entre os produtos de XCO₂ com as medidas de superfície em K67/SAN.

Sensor	OCO-2	GOSAT	MERGED	CAMS
RI (km)	170	170	170	-
Coef. correlação	0,4	0,8	0,9	0,8
Nº Medidas	4046	80	162	30928
Nº Dias	54	32	42	1941
Bias (ppm)	-4,3 ± 1,1	-5,2 ± 2,0	-1,3 ± 2,1	10,6 ± 1,0
Bias (%)	1,0 ± 0,26	-1,24 ± 0,48	-0,31 ± 0,5	2,3 ± 0,2
Erro (ppm)	11,7 ± 1,1	8,0 ± 1,0	7,0 ± 0,8	13,5 ± 0,2
Erro (%)	2,79 ± 0,26	1,90 ± 0,24	1,67 ± 0,19	3,0 ± 0,04
Int. de confiança do bias (ppm)	[-1,0; 7,5]	[0,8; 9,6]	[-5,1; 7,7]	[2,8; 4,2]

Taylor et al. (2021) também utilizou as medidas de superfície da rede TCCON para comparar com as medidas de XCO₂ do GOSAT obtidas a partir da nona versão do modelo de inversão ACOS v9 e encontrou um bias médio de 0,18 ppm e desvio padrão de 1,42 ppm. Entre abril de 2009 e maio de 2011 Cogan et al. (2012) avaliou as concentrações de XCO₂ do GOSAT em relação a 7 sítios da rede TCCON, de modo que o bias médio total considerando as medições em todos eles foi de -0,2 ppm e com desvio padrão de 2,46 ppm.

O Copernicus Climate Change Service (C3S) ao avaliar a qualidade do produto de XCO₂ do MERGED, entre 2013 e 2016, também comparou as suas medidas com as de superfície da rede TCCON e obteve um bias de aproximadamente 0,5 ppm com desvio padrão de 2 ppm (Buchwitz et al., 2018).

Dessa forma, os valores de bias e erro médio quadrático calculados entre os produtos de satélite de XCO₂ e as concentrações de superfície realizadas na floresta Amazônica nos sítios ATTO e K67/SAN mostram que os resultados da validação desenvolvida foram comparáveis aos resultados encontrados na literatura e descrito na Seção 1.4.

Para cada um dos valores de bias foram calculados seus respectivos intervalos de confiança com 95% de nível de confiança, de modo que em todas as comparações entre as medidas dos sensores de CO₂ e as de superfície no sítio ATTO o valor de bias nulo esteve dentro do intervalo, em K67/SAN o mesmo ocorreu apenas para o bias entre as medidas do OCO-2 e as de solo. Nas Tabelas 4.1 e 4.2 podemos ver que os valores de bias e erro correspondem a menos cerca de 1% da concentração global de CO₂ atmosférico.

Na Figura 4.20 e 4.22 estão apresentadas em vermelho as médias diárias das medidas de superfície, realizadas no sítio ATTO entre 2012 e 2021, dentro do critério colocação temporal relativo ao horário de passagem dos satélites. Em azul estão as médias diárias das medidas dos produtos de satélite. Da mesma forma, na Figura 4.21 temos as médias diárias

das medidas de superfície e de satélite entre 2009 e 2019. Assim, é possível visualizar que a média das medidas de satélite concordam com a médias das medidas de superfície, sendo consistente com os resultados de bias apresentados.

Na validação dos produtos de XCH₄ de satélite foram encontrados valores de bias subestimados em relação as medidas de superfície no sítio ATTO. Utilizando medidas do TROPOMI colocalizadas em um raio de 270 km foi obtido $-55,7 \pm 4,4$ ppb de bias e $60,0 \pm 5,7$ de erro. Entre as medidas de XCH₄ do GOSAT e as de superfície do sítio ATTO o bias foi $-30,2 \pm 11$ ppb com erro de $37,1 \pm 1,5$ ppb, e o produto MERGED apresentou um bias de $-34,1 \pm 12,5$ ppb e $40,6 \pm 3,3$ ppb de erro. O bias entre as medidas do modelo CAMS e as do sítio ATTO foi de $49,7 \pm 1,0$ ppb com erro médio quadrático de $55,1 \pm 0,8$ ppb.

Concentrações CH₄ dos produtos de satélite e no sítio ATTO

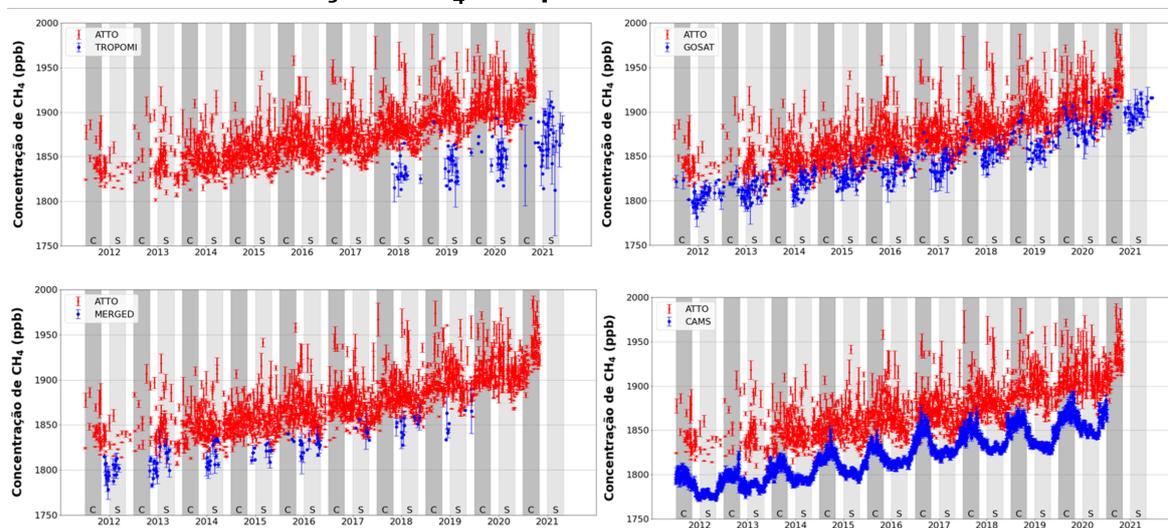


Figura 4.22: Concentrações médias de CH₄ no sítio ATTO entre 2012-2020 em vermelho comparadas com medidas dos produtos TROPOMI, GOSAT, MERGED e CAMS de XCH₄ dentro do raio de influência em torno da posição da medida de superfície de 270 km. As áreas em cinza marcam as estações seca (S) e chuvosa (C).

Tabela 4.3: Resultados da comparação entre os produtos de XCH₄ com as medidas de superfície no sítio ATTO.

Sensor	TROPOMI	GOSAT	MERGED	CAMS
RI (km)	270	270	270	-
Coef. correlação	0,4	0,7	0,6	0,6
Nº Medidas	2477	1077	294	13152
Nº Dias	56	291	75	2293
Bias (ppb)	-55,7 ± 4,4	-30,2 ± 10,6	-34,1 ± 12,5	49,7 ± 1,0
Bias (%)	-3,01 ± 0,24	-1,63 ± 0,57	-1,84 ± 0,68	2,8 ± 0,06
Erro (ppb)	60,0 ± 5,7	37,1 ± 1,5	40,6 ± 3,3	55,1 ± 0,8
Erro (%)	3,24 ± 0,31	2,01 ± 0,08	2,19 ± 0,18	3,1 ± 0,04
Int. de confiança do bias (ppb)	[48,2; 63,25]	[25,6; 34,7]	[26,7; 41,4]	[41,1; 44,7]

Hu et al. (2018); Lorente et al. (2021); Cooper et al. (2021) também mostraram que as medidas do TROPOMI costumam ser subestimadas em regiões com baixo albedo de superfície, como é o caso da floresta Amazônica. De modo que o bias médio obtido por Lorente et al. (2021) ao comparar com medidas superfície da rede TCCON foi -17 ppb com desvio padrão de 11,5 ppb e o encontrado por Hu et al. (2018) foi de -5,9 ppb com desvio padrão de 13,9 ppb. Para o GOSAT, em relação às medidas de superfície da rede TCCON Hu et al. (2018) obtiveram $-10,3 \pm 16,8$ ppb de bias e Parker et al. (2011) ao comparar as concentrações de XCH₄ do GOSAT com medidas de 6 sítios da rede TCCON distribuídos entre os Hemisférios Norte e Sul, entre agosto de 2009 e julho de 2010, teve como resultado valores de bias que variaram de -17 ppb a 2 ppb com precisão de 7 a 15 ppb (0,4-0,8%). E Webb et al. (2016) ao validar as concentrações de XCH₄ do GOSAT entre 2009 e 2004 com medidas de avião sobre a Amazônia encontrou um bias de -1,9 ppb a 9,7 ppb, para Rio Branco e Salinópolis.

Buchwitz et al. (2018) analisou o produto MERGED de XCH₄ para o período de 2003-2016, que é composto por produtos de metano do sensor SCIAMACHY (2003-2012) e do GOSAT (2012-2016). Ao validar esses dados em relação às medidas do sítio TCCON encontrou bias de 10 ppb com precisão entre 50-90 ppb associada ao SCIAMACHY e de 5 ppb para a do GOSAT com precisão de 20 ppb. Porém, como o período de comparação entre o produto MERGED e as medidas do sítio ATTO vai de 2012 a 2021 não incluem medidas do SCIAMACHY.

Portanto, os resultados da comparação entre as medidas de metano dos produtos de satélite com as medidas de superfície do sítio ATTO obtiveram valores de bias e erro maiores que os reportados na literatura, o que pode estar associado ao albedo da superfície da floresta e à cobertura de nuvens. Entretanto, a diferença média entre as concentrações

dos produtos de satélite com os da superfície foi de menos de 3% da concentração média global de metano na atmosfera, com erros entre 3% e 1% e, portanto, podem ser utilizados para monitorar as concentrações médias de CH₄ atmosférico na Amazônia Central.

4.5 Intercomparação entre os produtos de satélites

Intercomparando as medidas de XCO₂ de cada um dos produtos colocalizados em um raio de 270 km e 170 km em torno do sítio experimental ATTO e da torre K67/SAN, respectivamente, bem como com os produtos do modelo CAMS, o valor do coeficiente de correlação entre os pares analisados foram todos de 0,9, indicando que cada um detecta as sazonalidades das concentrações de XCO₂ de maneira similar. Os bias e os erros foram todos de menos de 1%, semelhante ao resultado da validação entre esses produtos e as medidas de superfície, como pode ser visto nas Tabelas 4.4-4.7.

Liang et al. (2017) intercomparou as concentrações de XCO₂ dos produtos do OCO-2 e do GOSAT em diferentes latitudes ao longo do globo e encontrou bias de 2 ppm entre elas. O resultado dessa intercomparação para as medidas sobre o centro e sul da América do Sul foi próximo de zero, de acordo com o resultado da intercomparação apresentado nesta seção (4.5).

Tabela 4.4: Valores calculados para intercomparação entre os produtos de XCO₂ satélite utilizados, colocalizados sobre o sítio experimental ATTO.

Produtos	OCO-2/GOSAT	OCO-2/MERGED	GOSAT/MERGED
Coef. correlação	0,9	0,7	0,6
N° Medidas	8155/52	8155 /59	52/59
N° Dias	5	17	20
Bias (ppm)	1,4 ± 2,0	0,1 ± 1,1	-2,5 ± 2,1
Bias (%)	0,3 ± 0,5	0,02 ± 0,26	0,60 ± 0,50
Erro (ppm)	1,6 ± 0,2	3,7 ± 0,2	5,6 ± 0,8
Erro (%)	0,38 ± 0,05	0,88 ± 0,05	1,33 ± 0,19
Int. de confiança do bias (ppm)	[-2,15; 5,7]	[-1,7; 2,6]	[-3,1; 2,5]

Tabela 4.5: Valores calculados para intercomparação entre os produtos de XCO₂ do modelo CAMS com os dos sensores dos satélites utilizados para o sítio ATTO.

Sensor	CAMS/OCO-2	CAMS/GOSAT	CAMS/MERGED
Coef. correlação	0,9	0,9	0,9
N° Medidas	186	32	37
Bias (ppm)	1,1 ± 0,6	2,0 ± 1,8	1,6 ± 2,0
Bias (%)	0,26 ± 0,14	0,43 ± 0,39	0,38 ± 0,43
Erro (ppm)	1,7 ± 0,1	3,0 ± 0,4	2,4 ± 0,3
Erro (%)	0,4 ± 0,02	0,7 ± 0,1	0,5 ± 0,1
Int. de confiança do bias (ppm)	[-2,0; -0,1]	[-4,5; 0,5]	[-4,6; 1,4]

Tabela 4.6: Valores calculados para intercomparação entre os produtos XCO₂ de satélite utilizados, colocalizados sobre Santarém.

Produtos	OCO-2/GOSAT	OCO-2/MERGED	GOSAT/MERGED
Coef. correlação	0,9	0,9	0,9
N° Medidas	4460/82	4460/39	82/39
N° Dias	4	8	27
Bias (ppm)	0,5 ± 1,7	-0,7 ± 1,4	-0,3 ± 2,4
Bias (%)	0,12 ± 0,40	0,17 ± 0,33	-0,07 ± 0,57
Erro (ppm)	2,6 ± 1,0	1,2 ± 0,2	1,10 ± 0,03
Erro (%)	0,62 ± 0,2	0,29 ± 0,1	0,26 ± 0,01
Int. de confiança do bias (ppm)	[-2,5; 2,0]	[-4,7; 6,3]	[-3,1; 2,7]

Tabela 4.7: Valores calculados para intercomparação entre os produtos de XCO₂ do modelo CAMS com os dos sensores dos satélites utilizados para o sítio K67/SAN.

Produtos	CAMS/OCO-2	CAMS/GOSAT	CAMS/MERGED
Coef. correlação	0,9	0,9	0,9
Nº Medidas	103	49	27
Bias (ppm)	1,0 ± 0,5	0,1 ± 1,7	0,7 ± 1,4
Bias (%)	0,2 ± 0,1	0,02 ± 0,4	0,2 ± 0,3
Erro (ppm)	1,6 ± 0,1	2,2 ± 0,2	1,9 ± 0,3
Erro (%)	0,3 ± 0,02	0,5 ± 0,04	0,4 ± 0,1
Int. de confiança do bias (ppm)	[-2,1; 0,05]	[-3,2; 3,0]	[-4,3; 3,0]

Comparando medidas de XCH₄ do TROPOMI e do GOSAT colocalizadas em um raio de 270 km em torno do sítio ATTO foi obtida uma correlação de 0,6 entre elas. O bias encontrado foi de -26,3 (6,2%) ± 11,8 (3%) ppb, sendo essa a mesma diferença entre os bias de cada um dos produtos em relação as medidas de superfície. Assim, [Lorente et al. \(2021\)](#) também observou que o TROPOMI quando comparado ao GOSAT subestima as concentrações de XCH₄ em 0,6% ± 0,8 %. Já o GOSAT e o produto MERGED de XCH₄ tiveram correlação de 0,9 e bias de -2,4 ± 16,3 ppb, em que nesse caso, as concentrações do GOSAT é que estão subestimadas em relação ao MERGED.

Tabela 4.8: Valores calculados para intercomparação entre os produtos XCH₄ de satélite utilizados, colocalizados sobre o sítio experimental ATTO.

Produtos	TROPOMI/GOSAT	TROPOMI/MERGED	GOSAT/MERGED
Coef. correlação	0,6	-	0,9
Nº Medidas	2477/1077	-	1077/294
Nº Dias	31	-	108
Bias (ppb)	-26,3 ± 11,8	-	-2,4 ± 16,3
Bias (%)	1,42 ± 0,64	-	0,13 ± 0,88
Erro (ppb)	33,6 ± 4,3	-	5,7 ± 0,8
Erro (%)	1,82 ± 0,23	-	0,31 ± 0,04
Int. de confiança do bias (ppb)	[-38,3; -14,3]	-	[-2,8; 7,6]

Tabela 4.9: Valores calculados para intercomparação entre os produtos de XCH₄ do modelo CAMS com os dos sensores dos satélites utilizados para o sítio ATTO.

Sensor	CAMS/TROPOMI	CAMS/GOSAT	CAMS/MERGED
Coef. correlação	0,5	0,9	0,9
Nº Medidas	69	393	116
Bias (ppb)	-1,1 ± 0,5	-19,1 ± 10,4	-17,1 ± 12,5
Bias (%)	0,06 ± 0,03	1,1 ± 0,6	1,0 ± 0,7
Erro (ppb)	15,7 ± 1,3	21,7 ± 0,8	19,7 ± 1,3
Erro (%)	0,9 ± 0,1	1,2 ± 0,04	1,1 ± 0,1
Int. de confiança do bias (ppm)	[-4,2; 6,4]	[15,4; 22,8]	[11,9; 22,2]

Capítulo 5

Conclusões e Perspectivas Futuras

Neste trabalho foram analisadas as concentrações de dióxido de carbono e metano através de produtos de satélite e comparadas com concentrações medidas em superfície na Amazônia no sítio experimental ATTO, na região central e no sítio da torre K67/SAN na parte leste da região Amazônica.

Em nove anos de medidas de CO₂ e de CH₄ realizadas no sítio ATTO as taxas de crescimento da concentração de ambos os gases foram similares à taxa de crescimento global, $2,36 \pm 0,07$ ppm ano⁻¹ de CO₂, $6,35 \pm 0,24$ ppb ano⁻¹ para o CH₄. Os gases apresentaram um padrão sazonal de concentrações maiores na estação chuvosa que na estação seca, 2,63 ppm para o CO₂ e 7,3 ppb para o metano. O ciclo diurno de CO₂ apresentou uma amplitude de cerca de 30 ppm, em que as concentrações mínimas ocorrem por causa da absorção de carbono pela fotossíntese das plantas. Isso também explica em parte as menores concentrações na estação seca, já que é o período com menor volume de chuvas e maior incidência de radiação solar sobre a região. A variabilidade da camada limite planetária certamente também influencia na concentração de gases, pois temos uma camada noturna com pequena altura (100-300 metros), enquanto que durante o dia temos aproximadamente 1500 metros de altura, além da variabilidade entre as estações, sendo 500 m mais alta na estação seca do que na chuvosa (Carneiro and Fisch, 2020). O ciclo diurno do metano no sítio ATTO apresentou amplitude 20 ppb. sendo maior na estação seca em que a altura da CLP também pode ser uma explicação.

Em Santarém, as medidas no sítio da torre K67/SAN iniciaram em 2002 e foram analisadas concentrações de CO₂ até 2019, mas essa série sofreu algumas interrupções entre os anos de 2006-2009 e de 2016-2017. A taxa de crescimento atmosférico de CO₂ foi de $2,60 \pm 0,07$ ppm ano⁻¹, também similar à taxa global. A sazonalidade das medidas mostrou que também é aproximadamente 2 ppm maior na estação chuvosa que na estação seca, porém, no último em 2019 foi identificado um crescimento entre a estação chuvosa de 2019 e a estação seca, que pode indicar a influência de queimadas chegando ao sítio experimental, porém mais investigações são necessárias.

Para realizar a comparação entre as medidas de satélite com as de superfície foi desenvolvida uma abordagem de colocação espacial, a fim de determinar o raio de influência para os produtos de satélite em torno da medida de superfície. Assim, seguindo os critérios da colocação, as medidas dos sensores de CO₂ e CH₄ em torno do sítio

ATTO foram de 270 km e para K67/SAN os produtos de CO₂ tiveram raio de influência de 170 km.

O produto de CO₂ com maior número de medidas foi o OCO-2 em ambos os sítios experimentais com aproximadamente 55 medidas por dia para o ATTO e 75 para K67/SAN, que é uma região com menor cobertura de nuvens, justificando o melhor desempenho do sensor na região em termos de número de medições. Entre os produtos de metano o que realizou maior número de medições foi o TROPOMI com cerca de 44 medidas por dia.

Os bias e erros calculados entre as concentrações dos produtos de XCO₂ com as de superfície no sítio ATTO representam menos de 1% da concentração atmosférica média global de CO₂ e de aproximadamente 2% utilizando o produto de modelagem CAMS, em que valores de bias nulo estiveram presentes em seus intervalos de confiança calculados com 95% de nível de confiança. Em K67/SAN também foi de cerca de 1% e erro de 2% da concentração atmosférica média global de CO₂ e de aproximadamente 2% e 3% utilizando o produto de modelagem CAMS, em que valores de bias nulo estiveram presentes no intervalo de confiança do bias entre as medidas do OCO-2 com as medidas de superfície desse sítio. Para o metano, as concentrações dos sensores foram subestimadas em relação às concentrações de superfície em que os bias e erros calculados foram entre 2% e 3% da concentração global de metano na atmosfera.

No futuro, será possível reproduzir esse estudo utilizando medidas de superfície realizadas no sítio ATTO na torre de 325 m tomadas no topo da torre, cujas medidas tiveram início recentemente. Seria também interessante analisar a uma comparação para um número maior de locais na Amazônia com medidas de superfície de metano. Além disso, uma vez os produtos de satélite validados, podemos explorar outras regiões da floresta que não possuem estações de superfície que monitorem as concentrações de CO₂ e CH₄ através de produtos validados.

Outra perspectiva interessante é expandir esse estudo e a metodologia utilizada para validar os produtos de satélite em outros biomas como o Pantanal e o Cerrado. Seria também interessante analisar as concentrações atmosféricas em relação ao uso do solo, utilizando análises como o MapBiomass, pois pode esclarecer este importante vínculo entre uso do solo e emissões de GEE. O impacto das emissões de queimadas nas concentrações de CO₂ e CH₄ também é importante de ser analisado, já que 49% de nossas emissões de GEE se dá através de desmatamento e queimadas. Bem como incluir medidas de GEE de outros sensores que entrarão em funcionamento nos próximos anos como o *Geostationary Carbon Cycle Observatory* (GeoCarb) que realizará medidas de CO₂ e CH₄ sobre as Américas.

Portanto, os resultados obtidos demonstraram que a obtenção de medidas de boa qualidade para regiões de baixo albedo de superfície e alta concentração de nuvens, como a floresta Amazônica, ainda é um desafio para os sensores e algoritmos dos modelos de inversão, tendo em vista o número reduzido de medidas ao longo de quase uma década,

como para o GOSAT. Mas mesmo com essas limitações, os valores de bias e erro calculados na comparação entre medidas dos sensores e de superfície nos sítios ATTO e K67/SAN demonstraram que eles são adequados para monitorar concentrações de CO₂ e CH₄ regionais sobre a floresta Amazônica.

Referências

- Andreae, M. O., O. C. Acevedo, A. Araújo, et al., 2015: The amazon tall tower observatory (atto): overview of pilot measurements on ecosystem ecology, meteorology, trace gases, and aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **15**, 10723–10776.
- Apituley, A., M. Pedernana, M. Sneep, et al., 2021: "Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Methane". 14-15 pp.
- Artaxo, P., H.-C. Hansson, M. O. Andreae, et al., 2022: Tropical and boreal forest atmosphere interactions: A review. *Tellus. Series B: Chemical and Physical Meteorology*.
- Basso, L. S., L. Marani, L. V. Gatti, et al., 2021: Amazon methane budget derived from multi-year airborne observations highlights regional variations in emissions. *Communications Earth & Environment*, **2**, 1–13.
- Beer, C., M. Reichstein, E. Tomelleri, et al., 2010: Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. *Science*, **329**, 834–838.
- Bocanegra, S. B., 2022: *Greenhouse gas exchange in the Amazon: Carbon dioxide and methane insights from the Amazon Tall Tower Observatory*. Tese de doutorado, Universidade do Wageningen.
- Botía, S., C. Gerbig, J. Marshall, et al., 2020: Understanding nighttime methane signals at the amazon tall tower observatory (atto). *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 6583–6606.
- Botía, S., S. Komiya, J. Marshall, et al., 2022: The co2 record at the amazon tall tower observatory: A new opportunity to study processes on seasonal and inter-annual scales. *Global Change Biology*, **28**, 588–611.
- Buchwitz, M., M. Reuter, O. Schneising, et al., 2018: Copernicus climate change service (c3s) global satellite observations of atmospheric carbon dioxide and methane. *Advances in Astronautics Science and Technology*, **1**, 57–60.
- Canadell, J. P. M., M. Costa, L. C. da Cunha, et al., 2021: "Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks". "Cambridge University Press", "Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.", 835 pp.
- Carneiro, R. G. and G. Fisch, 2020: Observational analysis of the daily cycle of the planetary boundary layer in the central amazon during a non-el niño year and el niño year (goamazon project 2014/5). *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 5547–5558.

- Chambers, J., D. Agarwal, S. Chin, et al., 2021: "SCIENCE PLAN Next-Generation Ecosystem Experiments (NGEE)-Tropics". 10-56 pp.
- Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, et al., 2013: "Carbon and Other Biogeochemical Cycles". "Cambridge University Press", "Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.", 470-475 pp.
- Cicerone, R. J. and R. S. Oremland, 1988: Biogeochemical aspects of atmospheric methane. *Global biogeochemical cycles*, **2**, 299–327.
- Cogan, A., H. Boesch, R. Parker, et al., 2012: Atmospheric carbon dioxide retrieved from the greenhouse gases observing satellite (gosat): comparison with ground-based tcon observations and geos-chem model calculations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **117**.
- Cooper, J., L. Dubey, and A. Hawkes, 2021: Methane detection and quantification in the upstream oil and gas sector: the role of satellites in emissions detection, reconciling and reporting. *Environmental Science: Atmospheres*.
- Crisp, D., H. R. Pollock, R. Rosenberg, et al., 2017: The on-orbit performance of the orbiting carbon observatory-2 (oco-2) instrument and its radiometrically calibrated products. *Atmospheric Measurement Techniques*, **10**, 59–81.
- Davidson, E. A. and P. Artaxo, 2004: Globally significant changes in biological processes of the amazon basin: results of the large-scale biosphere–atmosphere experiment. *Global Change Biology*, **10**, 519–529.
- De Gonçalves, L. G. G., J. S. Borak, M. H. Costa, et al., 2013: Overview of the large-scale biosphere–atmosphere experiment in amazonia data model intercomparison project (lba-dmip). *Agricultural and Forest meteorology*, **182**, 111–127.
- Eldering, A., P. Wennberg, D. Crisp, et al., 2017: The orbiting carbon observatory-2 early science investigations of regional carbon dioxide fluxes. *Science*, **358**, eaam5745.
- ESA, 2017: Sentinel-5p infographic. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Facts_and_figures, accessed: 2022-12-14.
- Friedlingstein, P., M. W. Jones, M. O’Sullivan, et al., 2022: Global carbon budget 2021. *Earth System Science Data*, **14**, 1917–2005.
- Gatti, L. V., L. S. Basso, J. B. Miller, et al., 2021: Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, **595**, 388–393.
- Gloor, E., 2019: The fate of amazonia. *Nature Climate Change*, **9**, 355–356.

- Group on Earth Observations (GEO), Climate TRACE, and World Geospatial Industry Council (WGIC), 2021: "GHG Monitoring from Space - Joint report by the Group on Earth Observations (GEO), Climate TRACE and the World Geospatial Industry Council (WGIC)". 14-21 pp.
- Hakkarainen, J., I. Ialongo, S. Maksyutov, and D. Crisp, 2019: Analysis of four years of global xco₂ anomalies as seen by orbiting carbon observatory-2. *Remote Sensing*, **11**, 850.
- Hu, H., J. Landgraf, R. Detmers, et al., 2018: Toward global mapping of methane with tropomi: First results and intersatellite comparison to gosat. *Geophysical Research Letters*, **45**, 3682–3689.
- Hutyra, L. R., J. W. Munger, S. R. Saleska, et al., 2007: Seasonal controls on the exchange of carbon and water in an amazonian rain forest. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, **112**.
- Jacob, D. J., A. J. Turner, J. D. Maasackers, et al., 2016: Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **16**, 14371–14396.
- Jacobson, M. Z., 2002: Fundamentals of atmospheric modeling. *Atmosphere*, **50**, 60.
- JAXA, 2021: Instruments and observational methods. <https://www.gosat.nies.go.jp/en/>, accessed: 2021-12-09.
- JAXA Mission & Instrument, 2009: Mission & instrument. https://www.eorc.jaxa.jp/GOSAT/mission_instrument.html, accessed: 2022-12-15.
- JPL/OCO-2 History, 2014: Oco-2/history. <https://ocov2.jpl.nasa.gov/mission/history/>, accessed: 2022-12-14.
- JPL/OCO-2 Measurement Approach, 2014: Oco-2/measurement approach. <https://ocov2.jpl.nasa.gov/science/measurement-approach/>, accessed: 2022-12-14.
- JPL/OCO-2 Science, 2014: Oco-2/science. <https://ocov2.jpl.nasa.gov/science/>, accessed: 2022-12-14.
- Kasting, J. F. and J. L. Siefert, 2002: Life and the evolution of earth's atmosphere. *Science*, **296**, 1066–1068.
- KNMI, 2021: Explanation about tropomi. <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/tropomi>, accessed: 2022-12-14.

- Kong, Y., B. Chen, and S. Measho, 2019: Spatio-temporal consistency evaluation of xco2 retrievals from gosat and oco-2 based on tcon and model data for joint utilization in carbon cycle research. *Atmosphere*, **10**, 354.
- LI-COR, Inc, 1996: Li-6262 co2/h2o analyzer - instruction manual. <https://www.licor.com/documents/umazybbyhzalz840pf63a1137qz7ofib>, accessed: 2022-11-22.
- Liang, A., W. Gong, G. Han, and C. Xiang, 2017: Comparison of satellite-observed xco2 from gosat, oco-2, and ground-based tcon. *Remote Sensing*, **9**, 1033.
- Loew, A., W. Bell, L. Brocca, et al., 2017: Validation practices for satellite-based earth observation data across communities. *Reviews of Geophysics*, **55**, 779–817.
- Lorente, A., T. Borsdorff, A. Butz, et al., 2021: Methane retrieved from tropomi: improvement of the data product and validation of the first 2 years of measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, **14**, 665–684.
- Malhi, Y., J. Melack, L. Gatti, et al., 2021: "Amazon Assessment Report 2021 - Chapter 6: Biogeochemical cycles in the Amazon". "United Nations Sustainable Development Solutions Network", "New York, USA", 5- pp.
- Mapbiomas, c. ., 2021: Amazônia - evolução anual da cobertura e uso da terra (1985-2021). https://mapbiomas.org/infograficos-1?cama_set_language=pt-BR, accessed: 2022-11-18.
- Maslin, M., 2014: *Climate change: a very short introduction*. OUP Oxford.
- Matsunaga, T. and S. Maksyutov, 2018: A guidebook on the use of satellite greenhouse gases observation data to evaluate and improve greenhouse gas emission inventories, satellite observation center. *National Institute for Environmental Studies: Tsukuba, Japan*, 129.
- Mohanakumar, K., 2008: *Stratosphere troposphere interactions: an introduction*. Springer Science & Business Media.
- Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, et al., 2013: "Anthropogenic and Natural Radiative Forcing". "Cambridge University Press", "Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.", 8-9 pp.
- NASA Solar Irradiance, 2022: Solar irradiance. <https://sunclimate.gsfc.nasa.gov/article/solar-irradiance>.
- Nobre, A. D., 2014: The future climate of amazonia, scientific assessment report. *Sponsored by CCST-INPE, INPA and ARA, São José dos Campos Brazil*.

- OCO-2 Science Team/Michael Gunson, A. E., 2021: Orbiting carbon observatory-2 3 (oco-2 oco-3) data product user's guide. https://docserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/public/project/OCO/OCO2_OCO3_B10_DUG.pdf, accessed: 2021-12-09.
- O'Dell, C., B. Connor, H. Bösch, et al., 2012: The acos co 2 retrieval algorithm—part 1: Description and validation against synthetic observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, **5**, 99–121.
- Paca, V. H. d. M., G. E. Espinoza-Dávalos, R. da Silva, et al., 2022: Remote sensing products validated by flux tower data in amazon rain forest. *Remote Sensing*, **14**, 1259.
- Parker, R., H. Boesch, A. Cogan, et al., 2011: Methane observations from the greenhouse gases observing satellite: Comparison to ground-based tcon data and model calculations. *Geophysical Research Letters*, **38**.
- Picarro, 2022: Cavity ring-down spectroscopy (crds). <https://www.picarro.com/company/technology/crds>.
- Pöhlker, C., D. Walter, H. Paulsen, et al., 2019: Land cover and its transformation in the backward trajectory footprint region of the amazon tall tower observatory. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **19**, 8425–8470.
- Potenza, R. F., G. de Oliveira Quintana, A. M. Cardoso, et al., 2021: "Análise das emissões brasileiras de e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020 gases de efeito estufa". "Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) ", "Brasil".
- Pyle, E. H., G. W. Santoni, H. E. Nascimento, et al., 2008: Dynamics of carbon, biomass, and structure in two amazonian forests. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, **113**.
- Qin, Y., X. Xiao, J.-P. Wigneron, et al., 2021: Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the brazilian amazon. *Nature Climate Change*, **11**, 442–448.
- Qu, Z., D. J. Jacob, L. Shen, et al., 2021: Global distribution of methane emissions: a comparative inverse analysis of observations from the tropomi and gosat satellite instruments. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **21**, 14159–14175.
- Raval, A. and V. Ramanathan, 1989: Observational determination of the greenhouse effect. *Nature*, **342**, 758–761.
- Restrepo-Coupe, N., L. P. Albert, M. Longo, et al., 2021: Understanding water and energy fluxes in the amazonia: Lessons from an observation-model intercomparison. *Global change biology*, **27**, 1802–1819.

- Reuter, M., M. Buchwitz, and O. Schneising-Weigel, 2021: Product user guide and specification (pugs) – annex d for products xco2_emma, xch4_emma, xco2_obs4mips, xch4_obs4mips (v4.3, 01/2003-06/2020). http://wdc.dlr.de/C3S_312b_Lot2/Documentation/GHG/C3S2_312a_Lot2_PUGS_GHG_D_latest.pdf, accessed: 2022-12-17.
- Saunio, M., A. R. Stavert, B. Poulter, et al., 2020: The global methane budget 2000–2017. *Earth system science data*, **12**, 1561–1623.
- Scripps CO2 Program, 2022: Atmospheric co2 data. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>.
- Silveira, M. V., C. H. Silva-Junior, L. O. Anderson, and L. E. Aragão, 2022: Amazon fires in the 21st century: The year of 2020 in evidence. *Global Ecology and Biogeography*, **31**, 2026–2040.
- Szopa, S., V. Naik, B. Adhikary, et al., 2021: "Short-lived climate forcers". "Cambridge University Press", "Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.", 835 pp.
- Taylor, T. E., C. O'Dell, D. Crisp, et al., 2021: An eleven year record of xco2 estimates derived from gosat measurements using the nasa acos version 9 retrieval algorithm.
- Trenberth, K. E., J. T. Fasullo, and J. Kiehl, 2009: Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **90**, 311–324.
- Webb, A. J., H. Bösch, R. J. Parker, et al., 2016: Ch4 concentrations over the amazon from gosat consistent with in situ vertical profile data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **121**, 11–006.
- Wunch, D., P. O. Wennberg, G. Osterman, et al., 2017: Comparisons of the orbiting carbon observatory-2 (oco-2) xco2 measurements with tccon. *Atmospheric Measurement Techniques*, **10**, 2209–2238.