

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA
CONCENTRAÇÃO DE CO₂ ATMOSFÉRICO E SUA
RELAÇÃO COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS NA
PATAGÔNIA ARGENTINA**

Juan Carlos Guerra Blas

Biólogo

2023

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA
CONCENTRAÇÃO DE CO₂ ATMOSFÉRICO E SUA
RELAÇÃO COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS NA
PATAGÔNIA ARGENTINA**

Juan Carlos Guerra Blas

Orientador: Prof. Dr. Newton La Scala Junior

Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal).

2023

B644v	Blas, Juan Carlos Guerra Variabilidade espacial e temporal da concentração de CO2 atmosférico e sua relação com variáveis ambientais na Patagônia Argentina / Juan Carlos Guerra Blas. -- Jaboticabal, 2023 64 p. : il., tabs., mapas Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientador: Newton La Scala Junior 1. OCO-2. 2. Mudanças climáticas. 3. Sensoriamento remoto. 4. Precipitação. 5. Patagônia. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE CO₂ ATMOSFÉRICO E SUA RELAÇÃO COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS NA PATAGÔNIA ARGENTINA

AUTOR: JUAN CARLOS GUERRA BLAS

ORIENTADOR: NEWTON LA SCALA JUNIOR

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal

Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal

Dr. MARCELO DANIEL NOSETTO (Participação Virtual)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) / São Luis/Argentina

Jaboticabal, 09 de outubro de 2023

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Juan Carlos Guerra Blas – Nascido na cidade de Huamachuco, La Libertad, norte do Peru, em 24 de junho de 1988, filho de Carlos Guerra Joaquin e Segunda Blas Salvatierra. Foi aluno do mestrado acadêmico no Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), campus de Jaboticabal. O foco de sua pesquisa foi relacionado com os padrões espaciais e temporais dos níveis de dióxido de carbono atmosférico, estoque de carbono no solo e índices climáticos e vegetativos na Patagônia Argentina. Este estudo foi conduzido por meio do projeto de pesquisa: "Variabilidade espacial e temporal da concentração de dióxido de carbono atmosférico e sua relação com variáveis ambientais na Patagônia Argentina", sob a orientação do Prof. Dr. Newton La Scala Júnior. Sua trajetória acadêmica inclui a conclusão do curso de Biologia em 2011 na Universidade Nacional de Trujillo, situada na cidade de mesmo nome, e o curso de Especialização em Sensoriamento Remoto Aplicado à Recursos Naturais pela Universidade de Buenos Aires, sob a orientação do Prof. Dr. Marcelo Nosetto. Ao longo dos últimos 10 anos, desempenhou a função de especialista em sistemas de informação geográfica e sensoriamento remoto para diferentes entidades governamentais do Peru, tais como o *Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado* (SERNANP), *Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre* (SERFOR), *Ministerio Público Fiscalía de la Nación del Perú*. Colaborou também com organizações não governamentais, incluindo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), *Conservación Amazónica* (ACCA) e a empresa *DAI Global*. Seu escopo de trabalho abrange uma diversidade de projetos de monitoramento ambiental em distintos biomas e ecossistemas da América do Sul, como os bosques esclerófilos do Chile, os bosques secos no norte do Peru, a floresta da Amazônia Ocidental, a Pampa Argentina e o sul do Brasil, além da Patagônia Argentina.

Aos meus pais,
Segunda Blas e Carlos Guerra,
a minhas irmãs Paola e Nancy,
minha esposa Malena.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero expressar minha profunda gratidão a Deus e aos meus pais pelo apoio incansável. Este título de mestre, é, sem dúvida, uma conquista de toda a nossa família. Agradeço pela força inspiradora e pelo exemplo de perseverança que sempre demonstraram na vida.

Manifesto também minha imensa gratidão às minhas irmãs, Paola Guerra Blas e Nancy Guerra Blas, pela simplicidade, carisma e pela união constante, mesmo diante da distância que nos separa. À minha esposa, Malena, dedico especial reconhecimento e agradecimento por seu apoio incondicional e amor infinito, que me motivam a embarcar em novas aventuras e enfrentar novos desafios na vida.

Expresso meus sinceros agradecimentos e profunda admiração ao meu orientador, Professor Doutor Newton La Scala Júnior. Trabalhar com um cientista tão notável, e, ao mesmo tempo, um ser humano excepcional, foi verdadeiramente motivador. Obrigado, professor!

Gostaria também de estender meus agradecimentos ao Professor Doutor Glauco de Souza Rolim e ao Professor Doutor Marcelo Nosetto por suas contribuições valiosas que aprimoraram este trabalho.

Agradeço ao corpo docente, administrativo e aos colegas discentes da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal – FCAV, em conjunto com o Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal). O atendimento dedicado e as aulas de excelente qualidade proporcionaram condições ideais para o meu processo de aprendizado. Meus agradecimentos especiais aos colegas e amigos que me apoiaram durante todo o processo de aprendizado: Wanderson De Lucena, Arianis Santos, Kleve e Federico.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Sendo assim, expresso minha sincera gratidão à CAPES pelo suporte financeiro (bolsa de estudos) fundamental para a realização desse estudo.

SUMARIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	iv
CAPÍTULO 1 – Considerações gerais	1
1.1 Introdução	1
1.2 Revisão de literatura.....	3
1.2.1. Mudanças Climáticas.....	3
1.2.2 A Patagônia Argentina.....	5
1.2.3. Patagônia Argentina: dimensões e oportunidades de sequestro de carbono	7
1.2.4. Sensoriamento remoto e o CO ₂ atmosférico.....	11
1.3 Objetivos gerais	13
1.4 Referências	13
CAPÍTULO 2 - Variabilidade espacial e temporal da concentração de CO ₂ atmosférico e sua relação com variáveis ambientais na Patagônia Argentina.....	21
2.1 Introdução	22
2.2 Material e métodos	24
2.2.1. Área de estudo	24
2.2.2. xCO ₂ , variáveis vegetativas e ambientais	25
2.2.3. Análise dos dados.....	28
2.3 Resultados e discussões	30
2.3.1 Padrões temporais do xCO ₂ e variáveis vegetativas NDVI, EVI, SIF na Patagônia	31
2.3.2 Padrões temporais de xCO ₂ e demais variáveis ambientais.....	33
2.3.3 Relação entre xCO ₂ e a precipitação acumulada na Patagônia Argentina ...	38
2.3.4 Análise espacial de CO ₂ atmosférico na Patagônia Argentina	42
2.4 Conclusões	45
2.5 Referências	46

Variabilidade espacial e temporal da concentração de CO₂ atmosférico e sua relação com variáveis ambientais na Patagônia Argentina

RESUMO - A compreensão dos fatores relacionados às emissões de gases de efeito estufa, como o CO₂, na Patagônia Argentina, pode contribuir para estabelecer as bases da sustentabilidade nesse ecossistema árido, tão influenciado por atividades antropogênicas quanto por variáveis climáticas. O objetivo deste estudo foi analisar a dinâmica espacial e temporal da concentração de xCO₂ na Patagônia Argentina, abrangendo o período de setembro de 2014 a janeiro de 2020. Além disso, buscou-se compreender como o comportamento do CO₂ se relaciona com variáveis vegetativas, como NDVI, EVI e SIF, bem como variáveis ambientais, incluindo precipitação, umidade do solo, radiação incidente e evapotranspiração de referência e temperaturas. Também foi analisada a relação entre o xCO₂ e as chuvas acumuladas nos meses prévios. Para conduzir esta pesquisa, utilizou-se a concentração média de CO₂ na coluna atmosférica (xCO₂) obtida a partir das observações do satélite OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2), além das variáveis ambientais obtidas de fontes de sensoriamento remoto. Os resultados revelam que o valor médio de xCO₂ na Patagônia foi de $399,45 \pm 0,15$ (erro padrão) ppm, com variações de acordo com os cinco grupos espaciais de xCO₂ identificados utilizando os valores mensais ao longo do período estudado. O comportamento sazonal do xCO₂ na Patagônia Argentina está intimamente relacionado às variáveis da vegetação e climáticas da região. No entanto, o resultado mais importante foi a relação direta e inversa significativa entre o xCO₂ e a precipitação acumulada de acordo ao número de meses prévios de chuva. Isso pode estar associado a processos de emissão e captura de CO₂ atmosférico, como respiração, fotodegradação e fotossíntese. Essas descobertas têm o potencial de aprimorar na compreensão dos fatores que influenciam as emissões de CO₂ em um ambiente árido, o que poderia ser utilizado para desenvolver medidas de mitigação e redução das concentrações de CO₂ na atmosfera.

Palavras-chave: OCO-2, sensoriamento remoto, precipitação, mudanças climáticas, Patagônia Sudeste.

Spatial and temporal variability of atmospheric CO₂ concentration and its relationship with environmental variables in Argentine Patagonia

ABSTRACT - Understanding the factors related to greenhouse gas emissions, such as CO₂, in Argentina Patagonia, can contribute to establishing the foundations of sustainability in this arid ecosystem, influenced as much by anthropogenic activities as by climatic variables. This study aimed to analyze the spatial and temporal dynamics of xCO₂ concentration in the Argentine Patagonia, covering the period from September 2014 to January 2020. Furthermore, we sought to comprehend how CO₂ behavior relates to vegetative variables such as NDVI, EVI, and SIF, as well as environmental variables including precipitation, soil moisture, incident radiation, reference evapotranspiration, and temperatures. The relationship between xCO₂ and accumulated rainfall in the previous months was also examined. To conduct this research, we utilized the average concentration of CO₂ in the atmospheric column (xCO₂) derived from observations captured by the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) satellite, in conjunction with environmental variables obtained from remote sensing data. Results reveal that the mean xCO₂ value in the Patagonia region was 399.45 ± 0.15 (standard error) ppm, exhibiting variations across five spatial xCO₂ groups identified using monthly values over the study period. The seasonal behavior of xCO₂ in the Argentine Patagonia is closely related to the region's vegetation and climatic variables. However, the most significant finding was the significant direct and inverse relationship between xCO₂ and accumulated precipitation over the preceding months. This may be associated with atmospheric CO₂ emission and uptake processes such as respiration, photodegradation, and photosynthesis. These findings have the potential to enhance our understanding of factors influencing CO₂ emissions in an arid environment, offering insights for developing mitigation measures to reduce atmospheric CO₂ concentrations.

Keywords: OCO-2, remote sensing, precipitation, climate change, Southeast Patagonia.

LISTA DE FIGURAS

Figura	página
Figura 1. Representação da precipitação na Patagônia Argentina	6
Figura 2. Distribuição da precipitação anual na Patagônia Argentina e da temperatura média anual.....	6
Figura 3. Distribuição espacial do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).....	8
Figura 4. Grupos funcionais da vegetação na América Latina.	9
Figura 5. Projeto Maras de monitoramento e inventários de cobertura vegetal na Patagônia Argentina.	10
Figura 6. Área de estudo que compreende a Patagônia Argentina (a) e as Biozonas, conforme definido por Soriano e Paruelo (1992) (b)	24
Figura 7. Fluxo de trabalho do análise espacial e temporal.....	29
Figura 8. Valor médio do xCO_2 na Patagônia Argentina e outros ecossistemas naturais e manejados com diferentes usos e ocupação do solo.....	31
Figura 9. Series do tempo das variáveis de vegetação de: (a) xCO_2 (b) SIF ($mWm^{-2}sr^{-1}nm^{-1}$) (c) NDVI, (d) EVI, ao longo do período de estudo para a Patagônia Argentina. .	33
Figura 10. Séries temporais de variáveis ambientais na Patagônia Argentina	35
Figura 11. Matriz de correlação entre xCO_2 e as variáveis ambientais na Patagônia Argentina	37
Figura 12. Dispersão e regressão linear de xCO_2 com as variáveis ambientais na Patagônia Argentina	38
Figura 13.(a). Série temporal do $xCO_2(ppm)$ e da precipitação(mm) acumulada. (b). Relação do índice de correlação de Pearson	41
Figura 14. Correlação entre o NDVI/Produtividade primaria bruta e a precipitação acumulada na Patagônia Argentina.	42
Figura 15. Representação dos cinco grupos de xCO_2 mediante o análise de cluster....	43
Figura 16. (a). Representação temporal dos valores de xCO_2 para cada grupo identificado. (b) Gráfico de boxplot apresentando o valor médio de xCO_2	45

LISTA DE TABELAS

Tabela	página
Tabela 1. Grupo de variáveis, fontes referencias e suas respectivas resoluções temporais e espaciais	28

Variabilidade espacial e temporal da concentração de CO₂ atmosférico e sua relação com variáveis ambientais na Patagônia Argentina

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1.1 Introdução

A concentração de gases de efeito estufa (GEE) têm aumentado nas últimas décadas a taxas preocupantes, principalmente o dióxido de carbono (CO₂). De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021) em 2019 o CO₂ na atmosfera atingiu cerca de 40,6 bilhões de toneladas de CO₂ o que representa uma concentração de 410 ppm, 144% acima dos níveis pré-industriais (IPCC, 2021).

As fontes de emissões antropogênicas de CO₂ podem ser pela liberação do carbono armazenado no solo e na biomassa aérea (Eswaran *et al.*, 1993; Le Toan *et al.*, 2011). Além disso, a queima de combustíveis fósseis, como carvão e petróleo, é responsável por uma grande proporção dessas emissões (Chhabra e Gohel 2019; Mousavi *et al.*, 2022). O desmatamento e as mudanças no uso e ocupação da terra também contribuem para as emissões de CO₂ na atmosfera (Santos *et al.*, 2022). As mudanças climáticas resultantes do aumento das concentrações dos gases de efeito estufa têm várias implicações, como o aumento da temperatura média global, eventos climáticos extremos mais frequentes e intensos, aumento do nível do mar, alterações nos padrões de precipitação e outros (Patra *et al.*, 2017; Castro *et al.*, 2020).

Especificamente na Patagônia Argentina, nos últimos 70 anos, tem ocorrido uma extensa degradação dos ecossistemas (Golluscio *et al.*, 1998; Campanella *et al.*, 2018), por exemplo as estepes outrora produtivas estão tornando-se desertificadas (Gonzalez e Ghermandi 2021; Irisarri *et al.*, 2021). As mudanças no uso do solo associadas a intensificação de atividades agropecuárias sob pastagens, vem impactando os estoques de carbono (C) do solo e biomassa aérea nestas regiões (Vogel *et al.*, 2022), degradando diversas áreas (Parente *et al.*, 2019). Esta diminuição nos estoques de C do solo e da biomassa aérea implicam em um aumento da concentração de CO₂ na atmosfera (Silletta

et al., 2019).

Além das atividades antrópicas no uso e ocupação do solo, o aumento da temperatura média, redução das chuvas e o aumento da frequência e intensidade dos eventos extremos, como as secas, têm acentuado a desertificação e degradação da Patagônia (Mazzonia e Vazquez 2009).

Compreender como essas mudanças têm interferido na dinâmica do C atmosférico na região é de fundamental importância para compreendermos os impactos do uso da terra e da variabilidade climática sobre a dinâmica do CO₂ e o efeito estufa adicional (Peri *et al.*, 2018). Desta forma, a Patagônia Argentina requer o monitoramento e caracterização de atributos diversos de tais ecossistemas, como a produtividade primária bruta e as trocas de carbono, para melhor compreensão dos desafios relativos à conservação e manejo desses ecossistemas visando reduzir o impacto ou, possivelmente, mitigar as mudanças climáticas (Cabello *et al.*, 2012).

A coluna média de CO₂ atmosférico (xCO₂) (Crisp *et al.*, 2012; O'Dell *et al.*, 2012) tem sido utilizada para monitorar potenciais fontes e sumidouros de carbono em escalas globais e regionais (Crowell *et al.*, 2019). Novos estudos têm avançado na compreensão dos fatores vegetativos (Chhabra e Gohel 2019; Siabi *et al.*, 2019), climáticos (Shekhar *et al.*, 2020; Mousavi *et al.*, 2022), manejo das culturas (Morais Filho *et al.*, 2021; Odorizzi *et al.*, 2022) e sua relação com xCO₂ (Morais Filho *et al.*, 2021; Odorizzi *et al.*, 2022).

Desta forma, estabelecer a relação entre a vegetação e o xCO₂ torna-se uma tarefa de suma importância, principalmente em ecossistemas degradados como a Patagônia Argentina (Paruelo *et al.*, 2004; Pettorelli *et al.*, 2018). Apesar de todos os esforços existem poucos estudos locais de amostragem de algumas regiões na Patagônia envolvendo a dinâmica do CO₂ atmosférico (Silletta *et al.*, 2019). Diversas investigações têm destacado que a concentração de CO₂ atmosférico está relacionado com fatores ambientais cruciais, como a precipitação e a temperatura. Estas variáveis desempenham um papel fundamental ao influenciar a produtividade vegetal e a capacidade de absorção de CO₂ nos ecossistemas em ambientes de baixas latitudes. Por exemplo, em condições de alta precipitação e temperaturas moderadas, as plantas de baixas latitudes tendem a aumentar sua taxa fotossintética e seu crescimento, o que resulta em maior absorção de

CO₂ da atmosfera. Isso, por sua vez, eleva o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) e a capacidade de armazenamento de carbono (Ahlstrom *et al.*, 2015; Da Costa *et al.*, 2022).

Em ambientes extremos, como a Patagônia Argentina, as condições se caracterizam por maiores índices de precipitação durante o inverno austral (Maio a Agosto), período no qual as temperaturas alcançam seus valores mínimos (Paruelo *et al.*, 1998; Castañeda e González 2008). Desta forma, buscou-se compreender como o CO₂ atmosférico se comporta em relação aos fatores controladores em ambientes caracterizados pela sazonalidade de baixas temperaturas e elevada precipitação durante o inverno, bem como altas temperaturas e precipitação reduzida no verão. Para isso foi analisado a dinâmica espacial e temporal da concentração de CO₂ atmosférico na região da Patagônia Argentina, investigando sua relação com variáveis vegetativas (como NDVI, EVI, SIF) e fatores ambientais, incluindo precipitação, umidade do solo, temperaturas, radiação incidente e evapotranspiração.

1.2 Revisão de literatura

1.2.1. Mudanças Climáticas

Segundo a *Emission Database for Global Atmospheric Research* (Crippa *et al.*, 2022), as emissões globais de CO₂ foram de 37,8 bilhões de toneladas em 2021, 52% a mais do que há duas décadas. Ao longo do século passado, o nível atmosférico de CO₂ aumentou mais de 39%, de 280 ppm durante o período pré-industrial (IPCC, 2021) para o recorde de 410 ppm em 2019 (IPCC, 2021), havendo um aumento correspondente na temperatura média global perto de 0,8 °C para o mesmo período (NOAA, 2023).

As atividades humanas estão causando impactos adversos no clima global com as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE) (Peters *et al.*, 2007; Montzka *et al.*, 2011). O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) declarou que o aquecimento global está influenciando os ecossistemas, os meios de subsistência humanos, a infraestrutura e a segurança alimentar (Pörtner *et al.*, 2022). Em

resposta, esforços globais, nacionais e locais estão sendo realizados para reduzir as emissões de GEE. Por exemplo, o Acordo de Paris, que entrou em vigor em novembro de 2016, tem como objetivo reduzir significativamente as emissões de GEE e limitar o aumento da temperatura global até 2 °C (Rogelj *et al.*, 2016; Kraaijenbrink *et al.*, 2017). No entanto, de acordo com o Programa Ambiental das Nações Unidas (UNEP), as medidas de mitigação, atuais e projetadas, estão longe de alcançar o objetivo do Acordo de Paris (Setzer e Higham 2022; Vogel, 2022), o que destaca a necessidade de ações adicionais significativas de adaptação e mitigação para cumprir os objetivos propostos.

Existe um consenso entre a comunidade científica de que a mitigação e a adaptação às mudanças climáticas são imprescindíveis para evitar impactos nos diferentes setores produtivos (IPCC, 2021). No entanto, esforços em níveis locais e regionais são essenciais para reduzir as emissões de GEE, como promover o uso sustentável dos recursos naturais e desenvolver estratégias de adaptação (Setzer e Higham 2022). No caso de América Latina, há a presença de diversas regiões de produção agrícola que apresentam maior vulnerabilidade aos efeitos das mudanças climáticas devido à forte dependência da agricultura para subsistência (IPCC, 2021; Jat *et al.*, 2016).

A Patagônia Argentina é uma das maiores pastagens do mundo em terras áridas, com uma estrutura de vegetação heterogênea e ampla variação climática (Austin e Sala 2002). A região é a base de atividades produtivas como o pastoreio de herbívoros domésticos e a silvicultura (Peri *et al.*, 2021). No entanto, modelos regionais de mudanças climáticas para o próximo século preveem um aumento das condições áridas devido à menor precipitação e temperaturas mais elevadas (IPCC, 2021). É provável que as mudanças climáticas tenham um impacto direto na estrutura e funcionamento da vegetação e no sequestro de carbono. Assim o uso de sistemas de monitoramento de longo prazo, com medições de campo como o projeto *Monitoring of Arid and Semiarid Regions* (MARAS) da Argentina (Oliva *et al.*, 2020). Além disso, dados de sensoriamento remoto podem ser um complemento para detectar e fornecer sinais para a degradação da Patagonia, especialmente em regiões não amostradas.

1.2.2 A Patagônia Argentina

A Patagônia Argentina também conhecida como Patagônia Sudeste, abrange uma extensão territorial de 433 628,996 km² e inclui as províncias de *Neuquén*, *Río Negro*, *Chubut*, *Santa Cruz* no território Argentino (Mazzonia e Vazquez, 2009). De acordo com a classificação de *Köppen* o clima predominante é de deserto frio, caracterizado por invernos muito frios e verões quentes (Paruelo *et al.*, 1998 ; Agosta *et al.*, 2019). A temperatura média anual varia de 15 °C no Nordeste a 3 °C no Sul (Gaitán *et al.*, 2011). A precipitação anual é baixa, inferior a 200 mm ano⁻¹ (Paruelo *et al.*, 1998), concentrada no inverno (Jobbágy *et al.*, 1995) com forte déficit hídrico no verão. A vegetação da região é diversificada, podendo ser classificada em sete categorias de cobertura denominadas *biozonas* baseadas em Soriano e Paruelo (1992).

Os solos da Patagônia Argentina são predominantemente originados de cinzas vulcânicas, sendo classificados como Andisols (Baillie, 2001). Esses solos compreendem cerca de 5% da região (Del Valle, 1998). Os Molisols representando aproximadamente 13% do território, estão concentrados em uma faixa norte-sul na parte ocidental da Patagônia, atuando como uma zona de transição entre a área úmida dos Andes (onde predominam os Andisols) e as terras secas extraandinas (dominadas por Aridisols e Entisols) (Del Valle, 1998).

Quanto ao clima, a porção central e ocidental da região é influenciada por massas de ar provenientes do Oceano Pacífico e moduladas pela presença da Cordilheira dos Andes, que atua como barreira para as correntes de ar úmido (Paruelo *et al.*, 1998) (Figura 1). Esses ventos ascendem pela encosta oeste, descarregando sua umidade principalmente no território chileno. A oeste dos Andes, na região Argentina, observa-se uma acentuada redução na precipitação, diminuindo de 2 000 mm/ano (ou mais) em algumas áreas dos Andes para menos de 200 mm/ano a uma distância de apenas 100 km (Jobbágy *et al.*, 1995; Paruelo *et al.*, 1998) (Figura 2). Durante o inverno, a precipitação na Patagônia Argentina aumenta na região devido ao aumento da intensidade da baixa subpolar, combinado com o deslocamento para o norte do centro de alta pressão do Pacífico (Grimm e Tedeschi, 2009).

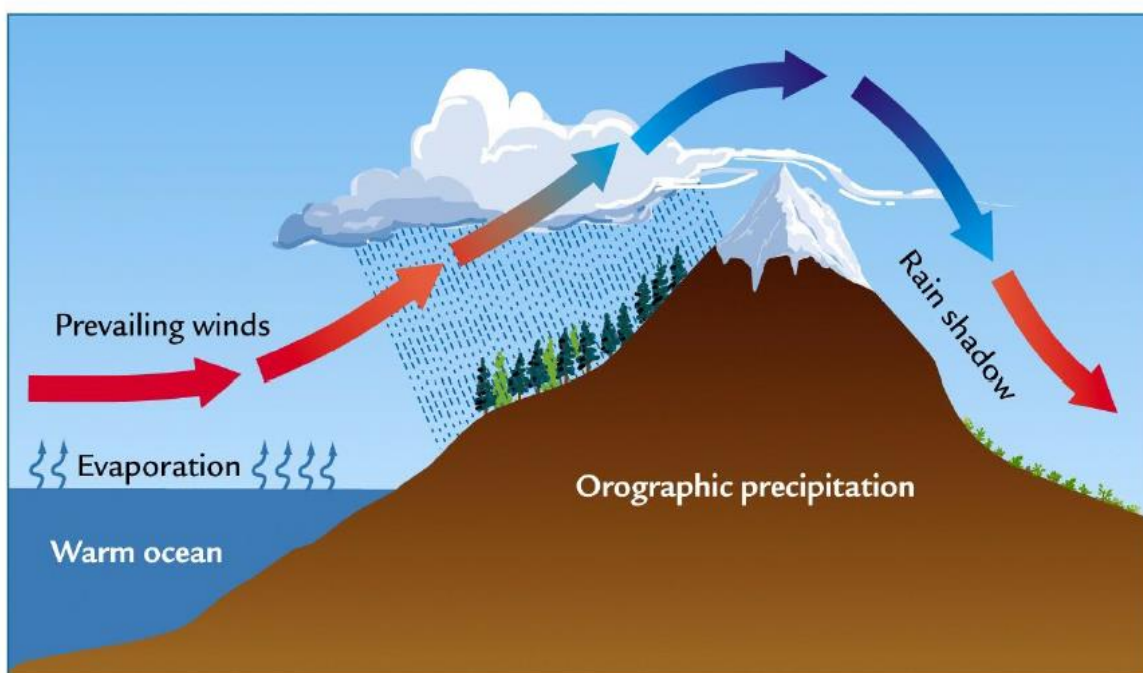


Figura 1. Representação da precipitação na Patagônia Argentina (Bernadetti, 2023)

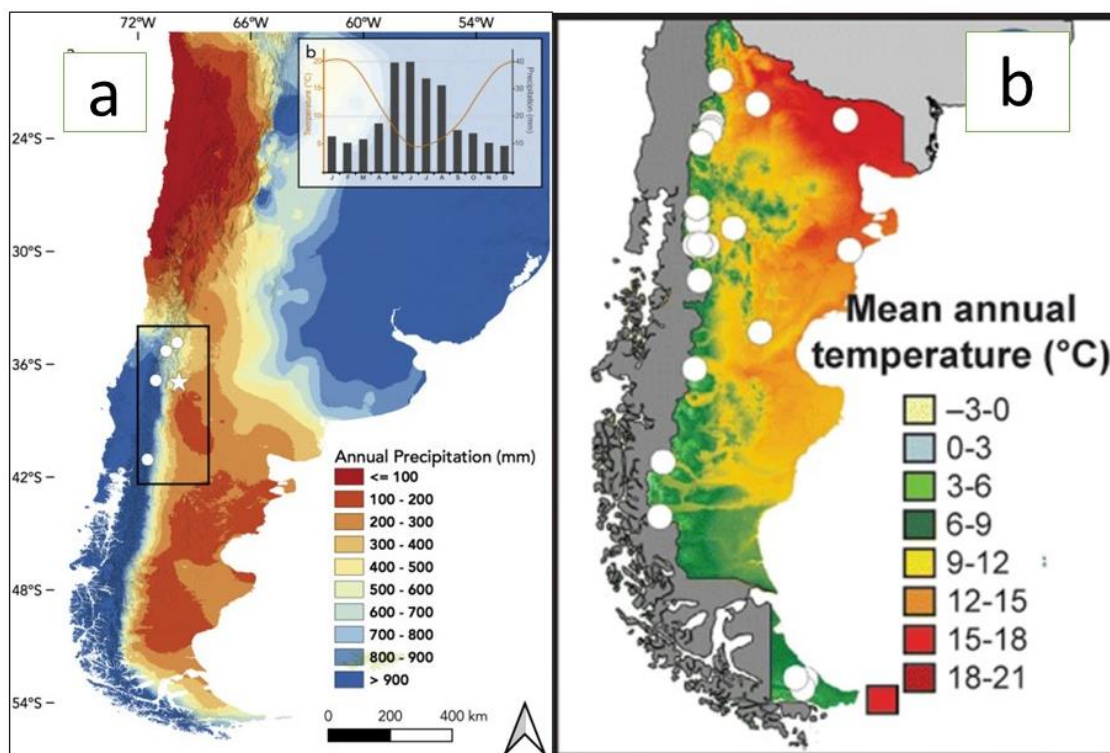


Figura 2. Distribuição da precipitação anual na Patagônia Argentina (Llano, *et al.*, 2020) e da temperatura média anual (Grech *et al.*, 2019).

1.2.3. Patagônia Argentina: dimensões e oportunidades de sequestro de carbono

À escala global, o planeta enfrenta os iminentes desafios das mudanças climáticas. Explorar as dimensões e as oportunidades de sequestro de carbono na Patagônia torna-se uma necessidade premente, não somente para preservar a biodiversidade, mas também para contribuir com soluções concretas baseadas na natureza (Yahdjian e Sala 2008). A vasta extensão e diversidade da cobertura vegetal na Patagônia Argentina, incluindo florestas e estepes, suscitam um interesse crescente no sequestro de carbono atmosférico e na mitigação das mudanças climáticas (Mazzonia e Vazquez 2009; Peri *et al.*, 2021).

As florestas densas, compostas por espécies arbóreas de crescimento lento, possuem a capacidade de acumular carbono ao longo de décadas e até séculos (Sottile *et al.*, 2015). Da mesma forma, as pastagens densas, constituídas por espécies de crescimento rápido, podem capturar carbono e armazená-lo no solo (Peri *et al.*, 2015). Portanto, os solos da região desempenham um papel fundamental, armazenando carbono proveniente da matéria orgânica em decomposição (Squires, 1998). Nesse contexto, o potencial da Patagônia Argentina como uma reserva natural de carbono ganha uma importância significativa na busca por soluções climáticas sustentáveis.

No âmbito da medição e avaliação, são essenciais os inventários de CO₂ submetidos ao Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), tanto em âmbito nacional, como o "GEAA" (Puliafito *et al.*, 2021), quanto internacional, como os dados do *EDGAR* (Janssens-Maenhout *et al.*, 2017). Estes dados desempenham um papel crucial na mensuração dos impactos dos sistemas produtivos em diversos setores, além de serem a base para estabelecer metas de redução como parte dos compromissos de redução de gases de efeito estufa (GEE). No contexto de Argentina, foram quantificados 3 200 Gg de CO₂, dos quais 13% provêm das práticas agrícolas e do uso do solo.

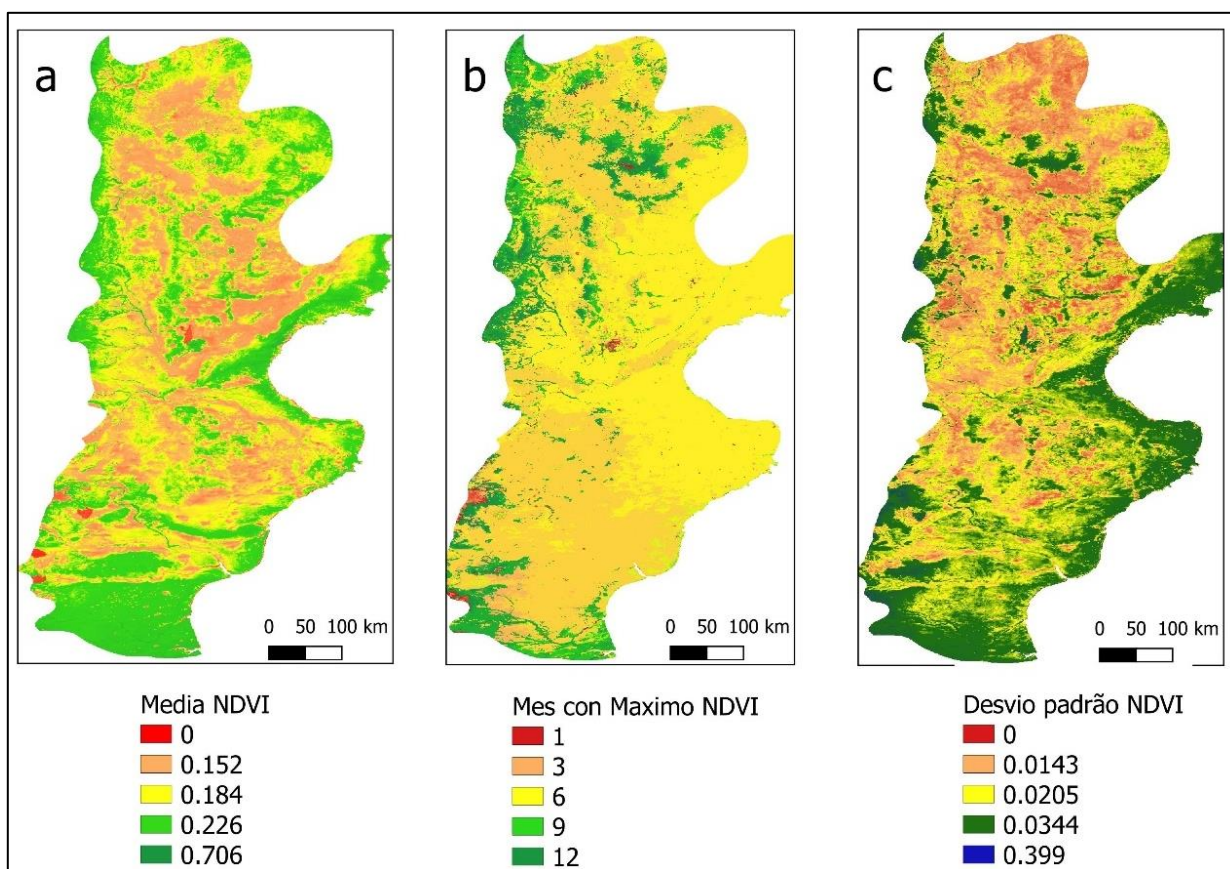


Figura 3. Distribuição espacial da média do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) **(a)** mês associado ao valor máximo de NDVI **(b)**, utilizando a escala de 1 a 12 para representar janeiro a dezembro. Desvio padrão do NDVI **(c)**, durante o intervalo temporal compreendido entre 2014 e 2020.

Apesar da revisão, identificamos poucos estudos sobre a concentração de CO_2 atmosférico na Patagônia Argentina (Silletta *et al.*, 2019). No entanto, deparamos com pesquisas relacionadas aos fluxos de carbono, como a produtividade primária bruta (GPP), a produtividade primária líquida (Paruelo *et al.*, 1998; Jobbágy e Sala 2000) e respiração do solo (Carbonell-Silletta *et al.*, 2022). Esses estudos abordam questões como a sazonalidade e a distribuição espacial da GPP na Patagônia (Jobbágy *et al.*, 2002)(Figura 3,4), além de discutirem os fatores de precipitação e temperatura associados à produtividade (Castañeda e González 2008; Fabricante *et al.*, 2009). Entretanto, a maioria desses estudos utilizaram dados de sensoriamento remoto, como AVHRR e MODIS, obtendo resultados consistentes com os inventários de cobertura vegetal e variáveis produtivas (Oliva *et al.*, 2020) (Figura 5).

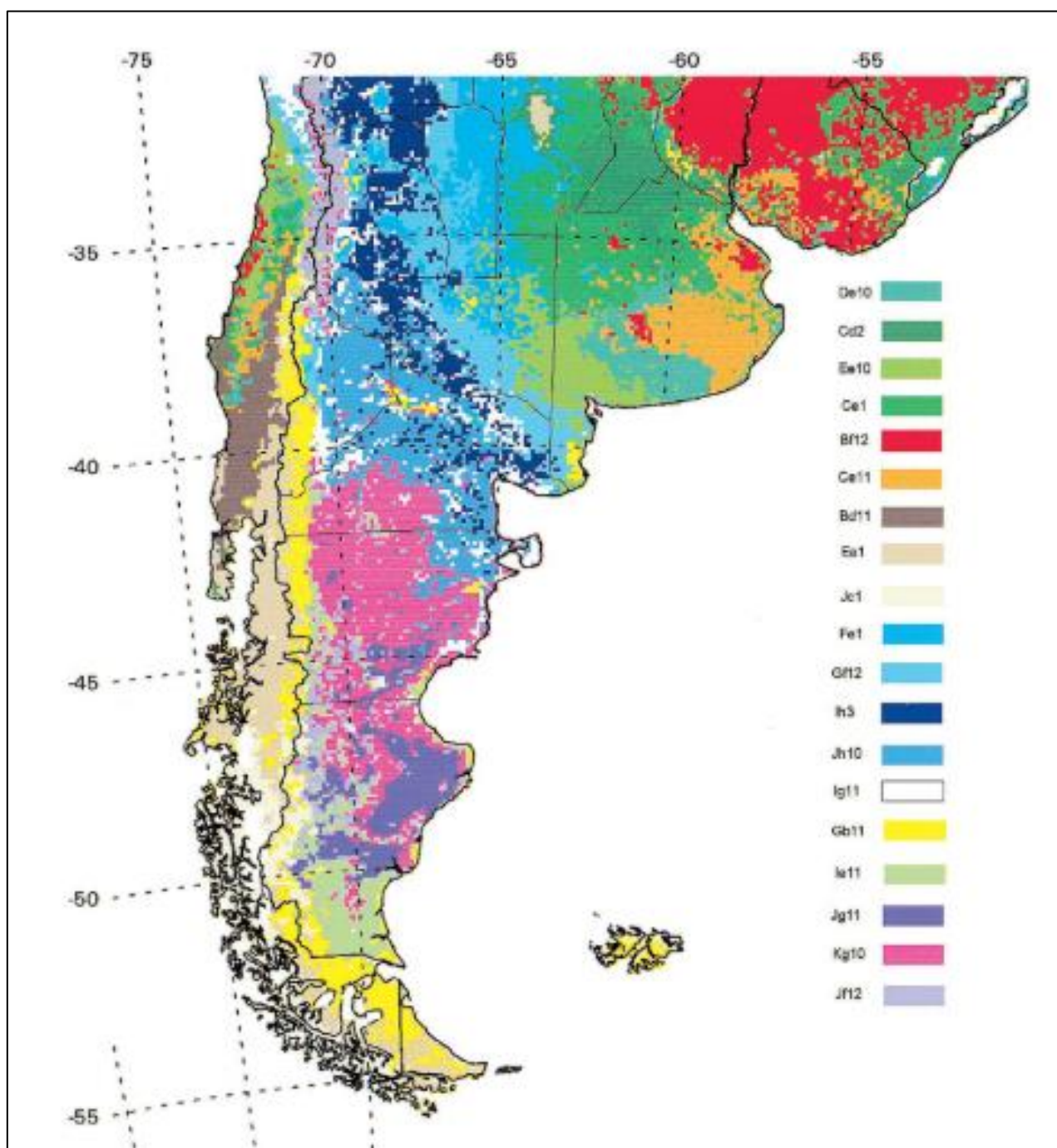


Figura 4. Grupos funcionais da vegetação na América Latina de acordo a Paruelo *et al.* (2001).

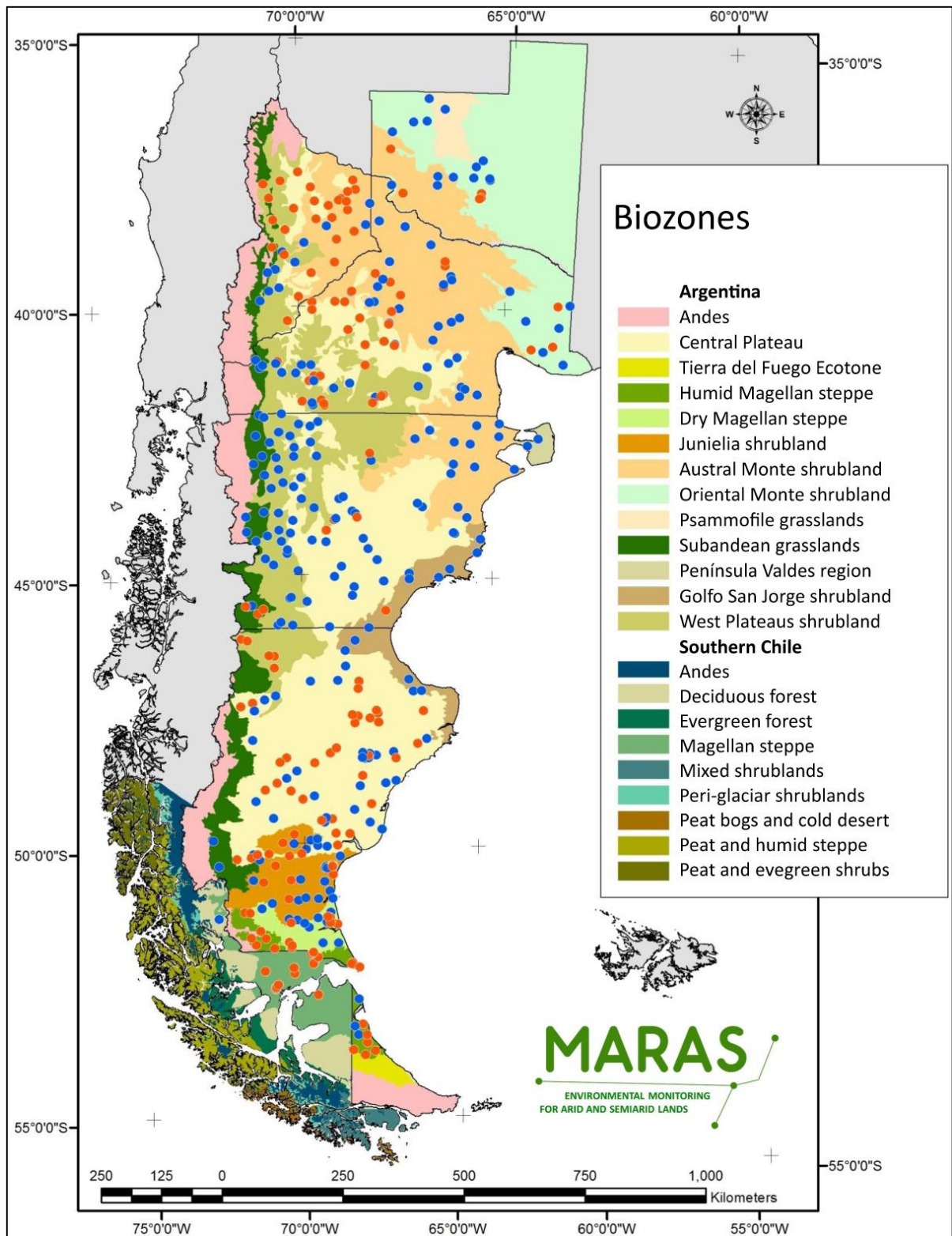


Figura 5. Projeto Maras de monitoramento e inventários de cobertura vegetal na Patagônia Argentina (Oliva *et al.*, 2020).

1.2.4. Sensoriamento remoto e o CO₂ atmosférico

A disponibilidade de dados da coluna-média de CO₂ atmosférico (xCO₂) tem se tornado comum nas últimas décadas graças a diversas missões espaciais (Barkley *et al.*, 2006; Wunch *et al.*, 2011). Nesse contexto, os dados de xCO₂ puderam ser adquiridos de missões como o *SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CartographY* (SCIAMACHY) a bordo do satélite *ENVironment SATellite* (EnviSat) da ESA, que operou entre 2002 e 2012 (Barkley *et al.*, 2006). Atualmente essas observações podem ser obtidas do *Thermal and Near Infrared Sensor for Carbon Observation-Fourier Transform Spectrometer* (TANSO-FTS) a bordo do GOSAT (lançado em 2009) (Wunch *et al.*, 2011), do OCO-2 da NASA (em operação desde 2014) e do *Atmospheric Carbon Dioxide Grating Spectrometer* (ACGS) a bordo do satélite chinês *Carbon Dioxide Observation Satellite* (TanSat) (em operação desde 2016).

Estudos relacionados a concentração atmosférica de CO₂ foram realizados em escala global (Basu *et al.*, 2013; Reuter *et al.*, 2014) e local (Siabi *et al.*, 2019; Morais Filho *et al.*, 2021). No que se refere à compreensão do CO₂ atmosférico, a fluorescência da clorofila induzida pelo sol (SIF, do inglês *Solar-Induced chlorophyll Fluorescence*) desempenha um papel importante (Frankenberg *et al.*, 2011; Joiner *et al.*, 2011). As observações orbitais da SIF envolvem a avaliação das linhas de Fraunhofer solares e bandas de absorção do oxigênio entre os comprimentos de onda de 755–775 nm. A partir desses estudos pioneiros, vários conjuntos de dados globais de SIF foram produzidos com base em espectrômetros de diferentes satélites, incluindo o GOME-2 (*Global Monitoring Ozone Experiment 2*) e o SCIAMACHY (*SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CartographY*) (Joiner *et al.*, 2012; Köhler *et al.*, 2015), além do OCO-2 (Sun *et al.*, 2018) e do TROPOMI (*TROPOspheric Monitoring Instrument*) (Köhler *et al.*, 2018). O OCO-2 é capaz de mensurar tanto o xCO₂ quanto a SIF, e ambas variáveis têm sido combinadas em diversos estudos para aprimorar a compreensão das fontes e sumidouros de CO₂ atmosférico (Siabi *et al.*, 2019; Morais Filho *et al.*, 2021).

Além da SIF, dados provenientes de diversas plataformas e sensores têm sido utilizados de forma sinérgica em estudos relacionados ao CO₂ atmosférico (Tucker *et al.*,

2005; Pedelty *et al.*, 2007). Por exemplo, os dados de SIF do OCO-2 foram combinados com dados do MODIS para desenvolver estimativas globais da SIF para o período de 2000 até o presente (por exemplo, GOSIF) (Li e Xiao, 2019). Sinergias entre *lidar* e *radar* melhoraram a acurácia nas estimativas de biomassa florestal (Hyde *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2011), enquanto a combinação do Landsat 8/OLI com o ICESat-2 aprimorou a estimativa de biomassa de arbustos e herbáceas (Glenn *et al.*, 2016). Adicionalmente, dados de temperatura da superfície do MODIS foram utilizados na identificação dos controles ambientais da concentração atmosférica de CO₂ em algumas áreas pastagens do Centro-Oeste do Brasil (Odorizzi *et al.*, 2022).

Destacamos também estudos que analisaram o CO₂ atmosférico em diferentes tipos de uso e ocupação do solo, como áreas desérticas no Irã (Falahatkar *et al.*, 2017; Mousavi *et al.*, 2022) e no Paquistão (An *et al.*, 2022), bem como áreas alagadas no Delta do Rio Nilo no Egito (Shekhar *et al.*, 2020), e áreas afetadas por monções na Índia (Chhabra e Gohel, 2019). No Brasil estudos sobre xCO₂ foram conduzidos em diferentes agroecossistemas, incluindo áreas de cana de açúcar em Pradópolis, São Paulo (Morais Filho *et al.*, 2021), Ribeirão Preto, São Paulo (Da Costa *et al.*, 2022), pastagem em Águas Claras, Mato Grosso do Sul (Morais Filho *et al.*, 2021), áreas agrícolas de soja (Morais Filho *et al.*, 2021), áreas agrícolas no Mato Grosso do Sul (Rossi *et al.*, 2022), pastagens degradadas e manejadas (Odorizzi *et al.*, 2022). Além disso, as mudanças no uso e ocupação do solo na região amazônica oriental, no Estado do Maranhão (Santos *et al.*, 2022).

Alguns estudos também investigaram os efeitos do *El Niño* (Eldering *et al.*, 2017; Patra *et al.*, 2017) e secas severas (Nogueira *et al.*, 2015) sobre a concentração atmosférica de CO₂ no hemisfério sul. A sinergia entre diferentes dados de sensoriamento remoto ganhará ainda mais atenção em estudos futuros do ciclo de carbono, principalmente as novas missões de satélites previstas para os próximos anos.

1.3 Objetivos gerais

Assim, ressaltando a relevância dos estudos sobre o CO₂ atmosférico em regiões como a Patagônia Argentina, visando contribuir com as medidas de mitigação em escala global, bem como a exploração das ferramentas do sensoriamento remoto do carbono. O presente estudo parte da hipótese de que os ecossistemas no sul do continente, como a Patagônia Argentina, exibem uma dinâmica temporal e espacial distinta em relação à concentração atmosférica de CO₂, quando comparados a latitudes menores e climas distintos, como a sazonalidade de baixas temperaturas e altas precipitações durante o inverno austral, e altas temperaturas e baixas precipitações durante o verão austral.

Dessa maneira, o objetivo deste estudo é analisar a dinâmica espacial e temporal da concentração atmosférica de CO₂ na Patagônia Argentina, investigando suas correlações com variáveis vegetativas (tais como NDVI, EVI, SIF) e fatores ambientais, como precipitação, temperatura do solo e do ar, radiação incidente e evapotranspiração.

1.4 Referências

- Agosta EA, Martin PB, Serio LA (2019) Persistent easterly winds leading to precipitation in the Atlantic Coast of Patagonia. **International Journal of Climatology** 39:5063–5090.
- Ahlstrom A *et al.* (2015) The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO₂ sink. **Science** 348:895–899.
- An N, Mustafa F, Bu L, Xu M, Wang Q, Shahzaman M, Bilal M, Ullah S, Feng Z (2022) Monitoring of Atmospheric Carbon Dioxide over Pakistan Using Satellite Dataset. **Remote Sensing** 14:5882.
- Austin AT, Sala OE (2002) Carbon and nitrogen dynamics across a natural precipitation gradient in Patagonia, Argentina. **Journal of Vegetation Science** 13:351–360.
- Barkley MP, Monks PS, Engelen RJ (2006) Comparison of SCIAMACHY and AIRS CO₂ measurements over North America during the summer and autumn of 2003. **Geophysical Research Letters** 33:20.
- Baillie, IC (2001) Soil Survey Staff 1999, Soil Taxonomy. **Soil Use and Management** 17:57–60.

Basu S *et al.* (2013) Global CO₂ fluxes estimated from GOSAT retrievals of total column CO₂. **Atmospheric Chemistry and Physics** 13:8695–8717.

Bernadetti (2023) Aulas de meteorologia e climatologia 2023 Universidade Federal de rios Grande do Sul.

Cabello J, Alcaraz-Segura D, Ferrero R, Castro AJ, Liras E (2012) The role of vegetation and lithology in the spatial and inter-annual response of EVI to climate in drylands of Southeastern Spain. **Journal of Arid Environments** 79:76–83.

Campanella MV, Rostagno CM, Videla LS, Bisigato AJ (2018) Land degradation affects shrub growth responses to precipitation in a semiarid rangeland of north-eastern Patagonia (Argentina). **Austral Ecology** 43:280–287.

Carbonell-Sillett L, Cavallaro A, Pereyra DA, Askenazi JO, Goldstein G, Scholz FG, Bucci SJ (2022) Soil respiration and N-mineralization processes in the Patagonian steppe are more responsive to fertilization than to experimental precipitation increase. **Plant Soil** 479:405–422.

Castañeda M, González M (2008) Statistical analysis of the precipitation trends in the Patagonia region in southern South America. **Atmosfera** 21:303–317.

Castro AO, Chen J, Zang CS, Shekhar A, Jimenez JC, Bhattacharjee S, Kindu M, Morales VH, Rammig A (2020) OCO-2 Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence Variability across Ecoregions of the Amazon Basin and the Extreme Drought Effects of El Niño (2015–2016). **Remote Sensing** 12(7):1202.

Chhabra A, Gohel A (2019) Dynamics of atmospheric carbon dioxide over different land cover types in India. **Environmental Monitoring and Assessment** 191:799.

Crippa M, *et al* (2022) CO₂ emissions of all world countries - JRC/IEA/PBL Report, EUR 31182 EN, Publications Office of the European Union. Luxembourg: European Union JRC130363.

Crisp D *et al.* (2012) The ACOS CO₂ retrieval algorithm - Part II: Global X CO₂ data characterization. **Atmospheric Measurement Techniques** 5:687–707.

Crowell S *et al.* (2019) The 2015-2016 carbon cycle as seen from OCO-2 and the global in situ network. **Atmospheric Chemistry and Physics** 19:9797–9831.

Da Costa LM, de Araújo Santos GA, de Mendonça GC, Morais Filho LFF, de Meneses KC, de Souza Rolim G, La Scala Jr N (2022) Spatiotemporal variability of atmospheric CO₂ concentration and controlling factors over sugarcane cultivation areas in southern Brazil. **Environment, Development and Sustainability** 24:5694–5717.

Del Valle HF (1988) Evaluación cuantitativa de un levantamiento de suelos de la región semiárida del noreste de Patagonia (Chubut). **Ciencia del Suelo** 6:136-150.

Eldering *et al.* (2017) The Orbiting Carbon Observatory-2 early science investigations of regional carbon dioxide fluxes. **Science** 358:6360

Eswaran H, Van Den Berg E, Reich P (1993) Organic carbon in soils of the World. **Soil Science Society of America Journal** 57:192–194.

Fabricante I, Oesterheld M, Paruelo JM (2009) Annual and seasonal variation of NDVI explained by current and previous precipitation across Northern Patagonia. **Journal of Arid Environments** 73:745–753.

Falahatkar S, Mousavi SM, Farajzadeh M (2017) Spatial and temporal distribution of carbon dioxide gas using GOSAT data over IRAN. **Environmental Monitoring and Assessment** 189: 627.

Frankenberg C *et al.* (2011) New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT: Patterns of plant fluorescence with gross primary productivity. **Geophysical Research Letters** 38:17.

Gaitán JJ, López CR, Bran DE (2011) Vegetation composition and its relationship with the environment in mallines of north Patagonia, Argentina. **Wetlands Ecology and Management** 19:121–130

Glenn NF, Neuenschwander A, Vierling LA, Spaete L, Li A, Shinneman DJ, Pilliod DS, Arkle RS, McIlroy SK (2016) Landsat 8 and ICESat-2: Performance and potential synergies for quantifying dryland ecosystem vegetation cover and biomass. **Remote Sensing of Environment** 185:233–242.

Golluscio RA, Deregibus VA, Paruelo JM (1998) Sustainability and range management in the Patagonian steppes. **Ecologia Austral** 8:265–284

Gonzalez SL, Ghermandi L (2021) Overgrazing causes a reduction in the vegetation cover and seed bank of Patagonian grasslands. **Plant Soil** 464:75–87.

Grech MG, Manzo LM, Epele LB, Laurito M, Claverie AÑ, Ludueña-Almeida FF, Miserendino ML, Almirón WR (2019) Mosquito (Diptera: Culicidae) larval ecology in natural habitats in the cold temperate Patagonia region of Argentina. **Parasites Vectors** 12:214

Grimm AM, Tedeschi RG (2009) ENSO and extreme rainfall events in South America. **Journal of Climate** 22:1589–1609.

Hyde P, Nelson R, Kimes D, Levine E (2007) Exploring LiDAR-RaDAR synergy-predicting aboveground biomass in a southwestern ponderosa pine forest using LiDAR, SAR and InSAR. **Remote Sensing of Environment** 106:28–38.

IPCC, (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud, N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, et al. (Eds) Cambridge University Press: Geneva, Switzerland.

Irisarri JGN, Texeira M, Oesterheld M, Verón SR, Della Nave F, Paruelo JM (2021) Discriminating the biophysical signal from human-induced effects on long-term primary production dynamics. The case of Patagonia. **Global Change Biology** 27(18):4381–4391.

Janssens-Maenhout G, *et al.* (2017) EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the three major Greenhouse Gas Emissions for the period 1970–2012. **Earth System Science Data**. [preprint] 79.

Jat ML, *et al.* (2016) Chapter Three - Climate Change and Agriculture: Adaptation Strategies and Mitigation Opportunities for Food Security in South Asia and Latin America.in.: Sparks DL (Ed.). **Advances in Agronomy**. Delaware-USA: Delaware Environmental Institute Interdisciplinary Science and Engineering Laboratory Newark,137, p.127-235.

Jobbágy EG, Paruelo JM, León RJ (1995) Estimación del régimen de precipitación a partir de la distancia a la cordillera en el noroeste de la Patagonia. **Ecología** 5:47–53

Jobbágy EG, Sala OE (2000) Controls of grass and shrub aboveground production in the Patagonian steppe. **Ecological Applications** 10:541–549.

Jobbágy EG, Sala OE, Paruelo JM (2002) Patterns and Controls of Primary Production in the Patagonian Steppe: A Remote Sensing Approach. **Ecology** 83:307–319

Joiner J, Yoshida Y, Vasilkov AP, Y. Yoshida, L. A. Corp, and E. M. Middleton (2011) First observations of global and seasonal terrestrial chlorophyll fluorescence from space. **Biogeosciences** 8:637–651.

Joiner J, Yoshida Y, Vasilkov AP, Middleton EM, Campbell PKE, Yoshida Y, Kuze A, Corp LA (2012) Filling-in of near-infrared solar lines by terrestrial fluorescence and other geophysical effects: Simulations and space-based observations from SCIAMACHY and GOSAT. **Atmospheric Measurement Techniques** 5:809–829.

Köhler P, Guanter L, Joiner J (2015) A linear method for the retrieval of sun-induced chlorophyll fluorescence from GOME-2 and SCIAMACHY data. **Atmospheric Measurement Techniques** 8:2589–2608.

Köhler P, Guanter L, Kobayashi H, Walther S, Yang W (2018) Assessing the potential of sun-induced fluorescence and the canopy scattering coefficient to track large-scale vegetation dynamics in Amazon forests. **Remote Sensing of Environment** 204:769–785.

Kraaijenbrink PDA, Bierkens MFP, Lutz AF, Immerzeel WW (2017) Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers. **Nature** 549:257–260.

Le Toan T *et al.* (2011) The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle. **Remote Sensing of Environment** 115:2850–2860.

Li X, Xiao J (2019) A global, 0.05-degree product of solar-induced chlorophyll fluorescence derived from OCO-2, MODIS, and reanalysis data. **Remote Sensing** 11:517.

Llano C, de Porras ME, Barberena R, Timpson A, Beltrame MO, Marsh EJ (2020) Human resilience to Holocene climate changes inferred from rodent middens in drylands of northwestern Patagonia (Argentina). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology** 557:109894.

Mazzonia E, Vazquez M (2009) Desertification in Patagonia. **Developments in Earth Surface Processes** 13:351–377.

Montzka SA, Dlugokencky EJ, Butler JH (2011) Non-CO₂ greenhouse gases and climate change. **Nature** 476:43–50.

Morais Filho LFF, Meneses KC de, Santos GA de A, da Silva Bicalho E, de Souza Rolim G, La Scala Jr N (2021) xCO₂ temporal variability above Brazilian agroecosystems: A remote sensing approach. **Journal of Environmental Management** 288(2):112433.

Mousavi SM, Dinan NM, Ansarifard S, Sonnentag O (2022) Analyzing spatio-temporal patterns in atmospheric carbon dioxide concentration across Iran from 2003 to 2020. **Atmospheric Environment: X** 14:100163.

NOAA (2023) National Centers for Environmental Information, Monthly Global Climate Report for Annual 2022, retrieved on August 28 available in <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213>.

Nogueira EM, Yanai AM, Fonseca FOR, Fearnside PM (2015) Carbon stock loss from deforestation through 2013 in Brazilian Amazonia. **Global Change Biology** 21(3):1271–1292.

O'Dell CW, *et al.* (2012) The ACOS CO₂ retrieval algorithm-Part 1: Description and validation against synthetic observations. **Atmospheric Measurement Techniques** 5:99–121.

Odorizzi de Campos M, Pellegrino Cerri CE, La Scala N (2022) Atmospheric CO₂, soil carbon stock and control variables in managed and degraded pastures in central Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment** 28:100848.

Oliva G, *et al.* (2020) The MARAS dataset, vegetation, and soil characteristics of dryland rangelands across Patagonia. **Scientific Data** 7:1–14.

Parente L, Mesquita V, Miziara F, Baumann L, Ferreira L (2019) Assessing the pasturelands and livestock dynamics in Brazil, from 1985 to 2017: A novel approach based on high spatial resolution imagery and Google Earth Engine cloud computing. **Remote Sensing of Environment** 232:111301.

Paruelo JM, Beltran A, Jobbagy E, Sala OE, Golluscio RA (1998) The climate of Patagonia: General patterns and controls on biotic processes. **Ecologia Austral** 8:85–101

Paruelo J, Jobbágy E, Sala O (2001) Current Distribution of Ecosystem Functional Types in Temperate South America. **Ecosystems** 4:683–698.

Paruelo JM, Golluscio RA, Guerschman JP, Cesa A, Jouve VV, Garbulsky MF (2004) Regional scale relationships between ecosystem structure and functioning: The case of the Patagonian steppes. **Global Ecology and Biogeography** 13:385–395.

Patra PK *et al* (2017) The Orbiting Carbon Observatory (OCO-2) tracks 2-3 peta-gram increase in carbon release to the atmosphere during the 2014-2016 El Niño. **Scientific Reports - Nature** 7:1–12.

Pedely J *et al* (2007) Generating a long-term land data record from the AVHRR and MODIS instruments. In: **IGARSS International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, p.1021–1024

Peri PL, Bahamonde H, Christiansen R (2015) Soil respiration in Patagonian semiarid grasslands under contrasting environmental and use conditions **Journal of Arid Environments** 119:1–8.

Peri PL, Martínez-Pastur G, Nahuelhual L (Eds.) (2021) Ecosystem services in Patagonia. A multi-criteria approach for an integrated assessment. Switzerland: **Springer Nature**, 501p.

Peri PL, Rosas YM, Ladd B, Toledo S, Lasagno RG, Martínez Pastur G (2018) Modelling soil carbon content in South Patagonia and evaluating changes according to climate, vegetation, desertification and grazing. **Sustainability** (Switzerland) 10(2):43.

Peters W *et al* (2007) An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker. **Proceedings of the National Academy of Sciences** 104:18925–18930.

Pettorelli N *et al.* (2018) Satellite remote sensing of ecosystem functions: opportunities, challenges and way forward. **Remote Sensing in Ecology and Conservation** 4:71–93.

Pörtner HO, *et al.* (2022) Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. In Contribution of working group II to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press

Puliafito SE, *et al* (2021) High resolution seasonal and decadal inventory of anthropic gas-phase and particle emissions for Argentina. **Earth System Science Data** 13: 5027-5069,

Reuter M *et al.* (2014) Satellite-inferred European carbon sink larger than expected. **Atmospheric Chemistry and Physics** 14:13739–13753.

Rogelj J, Den Elzen M, Höhne N, Fransen T, Fekete H, Winkler H, Schaeffer R, Sha F, Riahi K, Meinshausen M (2016) Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. **Nature** 534:631–639.

Rossi FS *et al.* (2022) Carbon dioxide spatial variability and dynamics for contrasting land uses in central Brazil agricultural frontier from remote sensing data. **Journal of South American Earth Sciences** 116:103809.

Santos GA de A, Morais Filho LFF, Meneses KC de M, Da Silva Junior CA, De Souza Rolim G, La Scala Jr. N (2022) Hot spots and anomalies of CO₂ over eastern Amazonia, Brazil: A time series from 2015 to 2018. **Environmental Research** 215 (2):114379.

Setzer J and Higham C (2022) Global trends in climate change litigation: 2022 snapshot. London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment and Centre for Climate Change Economics and Policy, London School of Economics and Political Science, 50p.

Shekhar A, Chen J, Paetzold JC, Dietrich F, Zhao X, Bhattacharjee S, Ruisinger V, Wofsy SC (2020) Anthropogenic CO₂ emissions assessment of Nile Delta using xCO₂ and SIF data from OCO-2 satellite. **Environmental Research Letters** 15:095010.

Siabi Z, Falahatkar S, Alavi SJ (2019) Spatial distribution of xCO₂ using OCO-2 data in growing seasons. **Journal of Environmental Management** 244:110–118.

Silletta LC, Cavallaro A, Kowal R, Pereyra DA, Silva RA, Arias NS, Goldstein G, Scholz FG, Bucci SJ (2019) Temporal and spatial variability in soil CO₂ efflux in the patagonian steppe. **Plant Soil** 444:165–176.

Squires VR (1998) Dryland soils: their potential as a sink for carbon and as an agent to mitigate climate change. **Advances in GeoEcology** 31:209-215

Sottile GD, Meretta PE, Tonello MS, Bianchi MM, Mancini MV (2015) Disturbance induced changes in species and functional diversity in southern Patagonian forest-steppe ecotone. **Forest Ecology and Management** 353:77–86.

Sun G, Ranson KJ, Guo Z, Zhang Z, Montesano P, Kimes D (2011) Forest biomass mapping from lidar and radar synergies. **Remote Sensing of Environment** 115:2906–2916.

Sun Y, Frankenberg C, Jung M, Joiner J, Guanter L, Köhler P, Magney T (2018) Overview of Solar-Induced chlorophyll Fluorescence (SIF) from the Orbiting Carbon Observatory-2: Retrieval, cross-mission comparison, and global monitoring for GPP. **Remote Sensing of Environment** 209:808–823.

Tucker CJ, Pinzon JE, Brown ME, Slayback DA, Pak EW, Mahoney R, Vermote EF, Saleous NE (2005) An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. **International Journal of Remote Sensing** 26:4485–4498.

Vogel B, Rostagno CM, Molina L, Antilef M, La Manna L (2022) Cushion shrubs encroach subhumid rangelands and form fertility islands along a grazing gradient in Patagonia. **Plant Soil** 475:623–643.

Wunch D *et al.* (2011) A method for evaluating bias in global measurements of CO₂ total columns from space. **Atmospheric Chemistry and Physics** 11:12317–12337.

Yahdjian L, Sala OE (2008) Climate change impacts on South American rangelands. **Rangelands** 30:34–39.

CAPÍTULO 2 - Variabilidade espacial e temporal da concentração de CO₂ atmosférico e sua relação com variáveis ambientais na Patagônia Argentina

Resumo - A compreensão dos fatores relacionados às emissões de gases de efeito estufa, como o CO₂, na Patagônia Argentina, pode contribuir para estabelecer as bases da sustentabilidade nesse ecossistema árido, tão influenciado por atividades antropogênicas quanto por variáveis climáticas. O objetivo deste estudo foi analisar a dinâmica espacial e temporal da concentração de xCO₂ na Patagônia Argentina, abrangendo o período de setembro de 2014 a janeiro de 2020. Além disso, buscou-se compreender como o comportamento do CO₂ se relaciona com variáveis vegetativas, como NDVI, EVI e SIF, bem como variáveis ambientais, incluindo precipitação, umidade do solo, radiação incidente e evapotranspiração de referência e temperaturas. Também foi analisada a relação entre o xCO₂ e as chuvas acumuladas nos meses prévios. Para conduzir esta pesquisa, utilizou-se a concentração média de CO₂ na coluna atmosférica (xCO₂) obtida a partir das observações do satélite OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2), além das variáveis ambientais obtidas de fontes de sensoriamento remoto. Os resultados revelam que o valor médio de xCO₂ na Patagônia foi de $399,45 \pm 0,15$ (erro padrão) ppm, com variações de acordo com os cinco grupos espaciais de xCO₂ identificados utilizando os valores mensais ao longo do período estudado. O comportamento sazonal do xCO₂ na Patagônia Argentina está intimamente relacionado às variáveis da vegetação e climáticas da região. No entanto, o resultado mais importante foi a relação direta e inversa significativa entre o xCO₂ e a precipitação acumulada de acordo ao número de meses prévios de chuva. Isso pode estar associado a processos de emissão e captura de CO₂ atmosférico, como respiração, fotodegradação e fotossíntese. Essas descobertas têm o potencial de aprimorar na compreensão dos fatores que influenciam as emissões de CO₂ em um ambiente árido, o que poderia ser utilizado para desenvolver medidas de mitigação e redução das concentrações de CO₂ na atmosfera.

Palavras-chave: OCO-2, xCO₂, sensoriamento remoto, precipitação, mudança climática Patagônia Sudeste.

2.1 Introdução

A concentração de gases de efeito estufa (GEE) têm aumentado nas últimas décadas a taxas preocupantes, principalmente o dióxido de carbono (CO_2). De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021) em 2019, o CO_2 na atmosfera atingiu cerca de 40,6 bilhões de toneladas, o que representa uma concentração de 410 ppm, 144% acima dos níveis pré-industriais (IPCC, 2021). O aumento das concentrações dos gases de efeito estufa têm várias implicações, como o aumento da temperatura média global, eventos climáticos extremos mais frequentes e intensos, alterações nos padrões de precipitação, entre outros (Castro *et al.*, 2020).

Nos ambientes áridos, como a Patagônia Argentina, as mudanças no uso do solo e as variações climáticas têm alterado os estoques de carbono (C), a produtividade primária bruta (GPP) e as emissões de CO_2 na atmosfera (Santos *et al.*, 2022). As mudanças no uso do solo associadas a intensificação de atividades agropecuárias, vem diminuindo os estoques de C do solo e na biomassa aérea na Patagônia Argentina (Vogel *et al.*, 2022; Silletta *et al.*, 2019). Além disso, o aumento da temperatura média, a redução das chuvas e o aumento da frequência e intensidade dos eventos extremos, como as secas, têm acentuado a perda dos estoques de C nos ecossistemas nesta região (Mazzonia e Vazquez 2009). Compreender como essas mudanças interferem na concentração do CO_2 atmosférico na região é de fundamental para superar os desafios relacionados à conservação e manejo desses ecossistemas, visando reduzir os impactos e desenvolver medidas de mitigação às mudanças climáticas (Peri *et al.*, 2018; Cabello *et al.*, 2012).

Compreender as relações relação entre variáveis ambientais como precipitação, a radiação incidente e as temperaturas no desenvolvimento da vegetação, podem proporcionar significativos avanços sobre o comportamento do CO_2 atmosférico. Em relação a outras regiões do mundo (Odorizzi *et al.*, 2022, Shekhar *et al.*, 2020), a Patagônia Argentina tem poucos estudos que analisam as relações entre o CO_2 atmosférico e as variáveis ambientais a escala regional (Silletta *et al.*, 2019). No entanto, para a Patagônia Argentina, há diversas investigações que têm destacado a relação entre

o NDVI (como indicador da Produtividade Primária Bruta, GPP) e fatores ambientais como a precipitação, a radiação incidente e as temperaturas Patagônia (Jobbágy *et al.*, 2002; Carbonell-Sillettta *et al.*, 2022). Além disso, alguns estudos ressaltam a forte influência das chuvas no desenvolvimento da vegetação (Castañeda e González 2008; Fabricante *et al.*, 2009). Algumas pesquisas aprofundaram a compreensão da relação entre a chuva acumulada ou de períodos prévios com o NDVI na Patagônia Argentina, destacando correlações significativas e diretas dos períodos passados (Jobbágy *et al.*, 2002; Fabricante *et al.*, 2009). Por outro lado, um aspecto ainda não explorado pela comunidade científica trata-se da relação entre as chuvas acumuladas dos ecossistemas, bem como a radiação incidente e as temperaturas com o CO₂ atmosférico. Este é justamente o foco principal da presente pesquisa e constitui uma contribuição fundamental para o conhecimento dos padrões de CO₂ atmosférico em ambientes áridos e sub-áridos, como a Patagônia Argentina. Além disso, alguns estudos indicam o papel da radiação incidente nas emissões de CO₂ atmosférico, assim temos a hipótese da fotodegradação na degradação biológica e física da matéria orgânica no solo e, conseqüentemente, a liberação de CO₂ na atmosfera (Austin e Vivanco, 2006). Todos esses estudos prévios contribuem para compreender os fatores que controlam o desenvolvimento da vegetação e, indiretamente, a captura e emissão de CO₂ atmosférico em regiões áridas como a Patagônia Argentina.

Com base nos antecedentes, foi planteado as seguintes três perguntas: Quais são as relações entre o CO₂ atmosférico e os índices de vegetação como o NDVI, EVI e o SIF, apesar da falta de sincronia entre as chuvas e a radiação no desenvolvimento da vegetação? Considerando a relação direta significativa entre o NDVI e as chuvas de períodos anteriores na Patagônia Argentina, é possível encontrar relações entre o CO₂ atmosférico e as chuvas acumuladas? Há uma variação espacial nas concentrações de CO₂ atmosférico na Patagônia Argentina? Dessa forma, os objetivos do estudo foram : i) Analisar a dinâmica espacial e temporal da concentração de xCO₂ na Patagônia Argentina, ii) Investigar as correlações entre o xCO₂ com variáveis vegetativas (como NDVI, EVI, SIF) e outras variáveis, incluindo precipitação e umidade do solo mensal e acumulada, radiação incidente, temperaturas e evapotranspiração, iii) Analisar a

correlação entre o $x\text{CO}_2$ e as chuvas acumuladas.

2.2 Material e métodos

2.2.1. Área de estudo

A área de estudo compreende o bioma da Patagônia Argentina (Figura 6), com extensão territorial de 433 628,996 km², abrangendo as províncias de Neuquén, Río Negro, Chubut e Santa Cruz na Argentina (Mazzonia e Vazquez, 2009). A área de estudo é delimitada pelas seguintes coordenadas: Norte (longitude $-70^\circ 49' 12''$ e latitude $-39^\circ 37' 12''$), Nordeste (longitude $-66^\circ 27' 10''$ e latitude $-41^\circ 17' 60''$), Sul (longitude $-69^\circ 0' 36''$ e latitude $-51^\circ 46' 12''$) e Sudoeste (longitude $-72^\circ 30' 0''$ latitude $-49^\circ 58' 48''$).

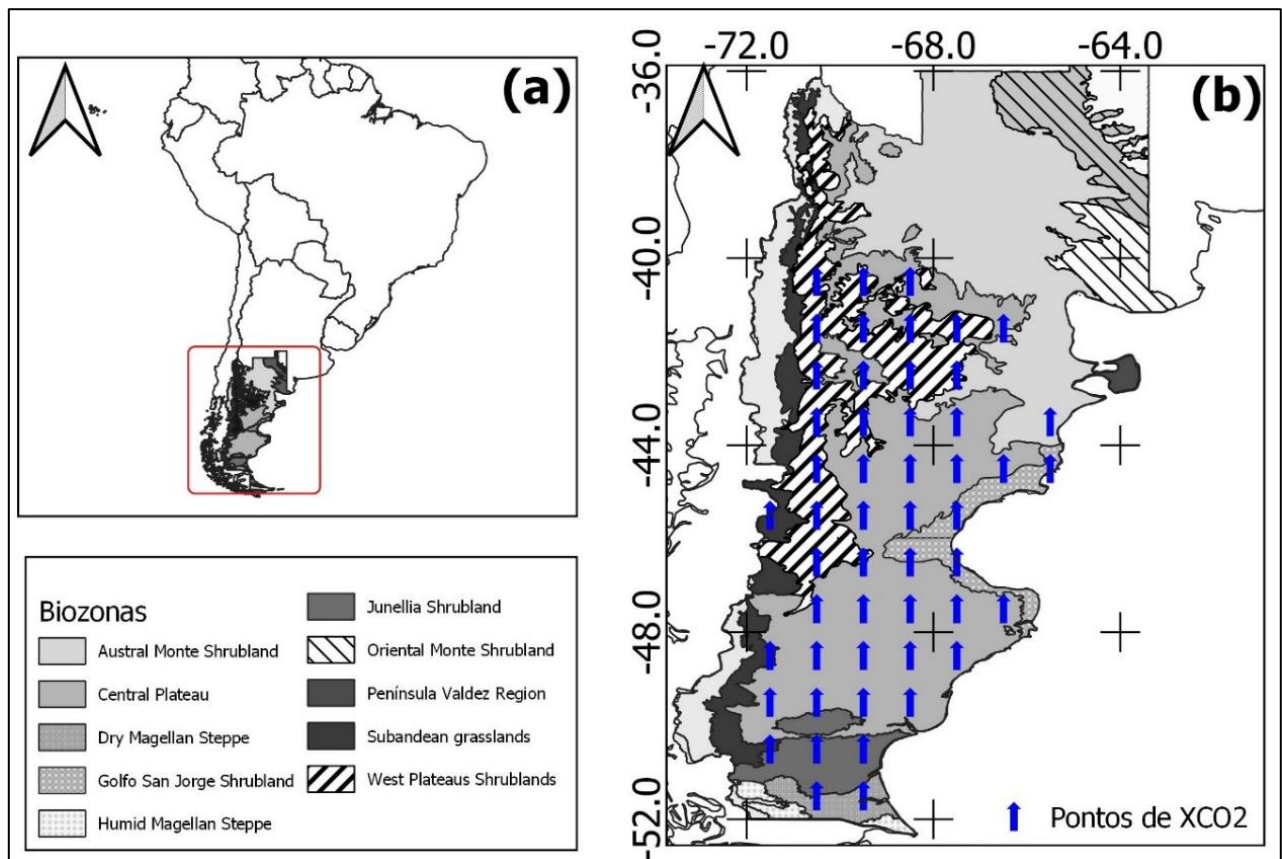


Figura 6. Área de estudo que compreende a Patagônia Argentina (a) e as *Biozonas*, conforme definido por Soriano e Paruelo (1992) (b). As setas verticais em azul indicam os pontos de $x\text{CO}_2$.

De acordo com a classificação de *Köppen*, o clima predominante é de deserto frio, caracterizado por invernos muito frios e verões quentes (Paruelo *et al.*, 1998 ; Agosta *et al.*, 2019). A temperatura média anual varia de 15 °C no Nordeste a 3 °C no Sul (Gaitán *et al.*, 2011). A precipitação anual é inferior a 250 mm ano⁻¹ (Paruelo *et al.*, 1998), concentrada no inverno (Jobbágy *et al.*, 1995) com forte déficit hídrico no verão. A vegetação da região é diversificada, podendo ser classificada em sete categorias de cobertura denominadas *biozonas*, baseadas em Soriano e Paruelo (1992) (Figura 6).

2.2.2. xCO₂, variáveis vegetativas e ambientais

Para investigar a variação temporal das variáveis vegetativas e ambientais utilizou-se uma série temporal de Setembro de 2014 a Janeiro de 2020. As variáveis vegetativas deste estudo incluem: a Concentração Média de CO₂ na Coluna Atmosférica (xCO₂), definida como a média da concentração de CO₂ na atmosfera entre 10 e 12 km de altitude (O'Dell *et al.*, 2012); a Fluorescência da Clorofila Induzida pelo sol (SIF), uma medida relacionada à atividade fotossintética das plantas (Frankenberg *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2017); o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) como métrica para avaliar a saúde e densidade da vegetação (Defries e Townshend 1994), o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada Melhorado (EVI), uma versão aprimorada do NDVI (Turner *et al.*, 1999); As variáveis ambientais deste trabalho incluem: temperatura da superfície terrestre durante o dia e à noite, que envolve medições da temperatura da superfície terrestre em diferentes momentos do dia (Julien *et al.*, 2006; Imhoff *et al.*, 2010); o Albedo, referindo-se à porcentagem de radiação solar refletida pela superfície terrestre (Boschetti *et al.*, 2015), temperatura mínima e máxima, como as temperaturas mais baixas e mais altas registradas durante o período analisado; a radiação incidente, relacionada à quantidade de energia solar atingindo a superfície terrestre; a precipitação acumulada que envolve a quantidade total de precipitação que ocorreu durante o período de interesse; umidade do solo, expressada como porcentagem de água no solo; e, finalmente evapotranspiração de referência, como uma medida da perda de água da superfície do solo devido à evaporação e transpiração das plantas (Abatzoglou *et al.*,

2018)(Tabela 1).

As informações de xCO_2 e SIF possuem uma resolução espacial de $2,25 \times 1,29$ km e uma resolução temporal de 16 dias, espaçados de até 2 km. Ambos foram coletados da plataforma *Orbiting Carbon Observatory*, um satélite dos Estados Unidos conhecido como OCO-2 (<https://co2.jpl.nasa.gov/?mission=oco-2>). O OCO-2 foi lançado pela NASA em julho de 2014 e disponibiliza dados do xCO_2 e o SIF desde setembro de 2014 (Crisp *et al.*, 2012). Os dados de xCO_2 (versão V9r) são recuperados por meio do algoritmo proposto por O'Dell *et al.* (2012). Para a análise temporal, esses dados de xCO_2 e o SIF foram reduzidos para uma escala mensal através da mediana, abrangendo todo o período de estudo de Setembro de 2014 a Janeiro de 2020. Para eliminar as tendências globais nas séries temporais de xCO_2 , empregou-se o método de regressão linear, conforme descrito por Gujarati e Porter (2011). Esse método consiste na diferença entre a regressão linear dos dados e os próprios dados, ajustando uma tendência temporal da concentração de xCO_2 por meio da equação de regressão $y = 0,007x + 276,2$, em que y representa a concentração de xCO_2 original com tendência e x representa o resíduo da concentração de xCO_2 original. O coeficiente 0,007 representa a inclinação do aumento do xCO_2 e o valor de 276,2 é o termo independente da equação. Além disso, foram removidos os *outliers* utilizando o método de identificação do intervalo interquartil (IQR) (Wang *et al.*, 2018).

No que se refere ao SIF ($mW m^{-2} sr^{-1} nm^{-1}$), foi utilizada o produto derivado de SIF de OCO-2 (SIF_OCO2_005) (Yu *et al.*, 2021), que é um produto espacialmente contínuo de SIF gerado pelo treinamento de uma rede neural artificial (ANN) de observações SIF do OCO-2 e a refletância de superfície de sete bandas corrigida pelo MODIS BRDF. (Yu *et al.*, 2021). O produto gerado tem uma resolução temporal de 16 dias e uma resolução espacial de 0,05 graus (aproximadamente 5 km no equador) disponíveis de setembro de 2014 a julho de 2020. Além disso os valores negativos foram removidos do banco de dados, por serem considerados erros de captura do sensor (Yu *et al.*, 2019).

O NDVI e o EVI possuem uma resolução temporal de 16 dias e uma resolução espacial de 500×500 metros (Tabela 1). Ambos foram obtidos a partir do sensor Espectrorradiômetro de Imageamento de Resolução Moderada (MODIS), que está a

bordo do satélite TERRA (AppEEARS, 2022). Valores mais elevados de NDVI o EVI corresponde a áreas de vegetação com alta densidade e atividade fotossintética; em contrapartida, valores mais baixos indicam áreas de vegetação com baixa atividade fotossintética ou outras coberturas que não são vegetação, como corpos de água ou solo descoberto (Defries e Townshend 1994; Baldassini *et al.*, 2012).

As temperaturas do dia (LST Day) e da noite (LST Night) da superfície terrestre (Zhang *et al.*, 2014) (°C) foram recuperadas a partir de observações em sete bandas da faixa Infravermelho Térmico (TIR) (Mutibwa *et al.*, 2015), realizadas pelo MODIS-EARTH (AppEEARS, 2022). Neste estudo, optou-se por resoluções temporais mensais e espacialização de 1 km x 1 km. O produto MOD11A2 fornece a temperatura da superfície terrestre. Cada valor de pixel é uma média de todos os pixels correspondentes no MOD11A2 LST (AppEEARS, 2022). Neste estudo, propusemos a utilização das temperaturas médias mensais em pontos de amostragem georreferenciados, tanto para os períodos diurnos e noturnos, conforme empregado por Odorizzi *et al.* (2022).

Além disso, as variáveis ambientais, como precipitação, umidade do solo, temperaturas mínimas e máximas, radiação incidente, evapotranspiração de referência, foram utilizados os dados climáticos históricos da plataforma Terraclimate, coletados e processados no editor de códigos no Google Earth Engine (Gorelick *et al.*, 2017) (<https://www.climatologylab.org/terraclimate.html>, acessada em 22 de abril de 2022). Esses dados são apresentados em forma de uma grade mensal de informações climáticas para superfícies terrestres em todo o mundo. A obtenção desses dados baseia-se na interpolação com a assistência dos conjuntos de dados do WorldClim (Abatzoglou *et al.*, 2018). Este conjunto de dados é amplamente empregado na criação de cenários para estudos ambientais e ecológicos em escalas regionais. No presente estudo, foram utilizados valores mensais das variáveis mencionadas para a série temporal estudada (Figura 6). No caso da variável evapotranspiração, foi utilizado a evapotranspiração de referência (ET_0), a qual foi calculada por meio do modelo de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1988).

Todos os dados de satélite relacionados às variáveis ambientais da Patagônia Argentina (Tabela 1) foram reduzidos para uma escala mensal, abrangendo o período de

Setembro de 2014 a Janeiro de 2020.

Tabela 1. Grupo de variáveis, fontes referencias e suas respectivas resoluções temporais e espaciais

Variável	Dados	Unidade	Fonte	Referência	Resolução temporal	Resolução espacial
GHG	Columna total de CO ₂ atmosférico xCO ₂	ppm	NASA OCO-2	O'Dell et al., 2012	16 dias	1,0 x 2,25 km
Vegetação	Índice de vegetação normalizado NDVI	0-1	MOD13Q1.061	Defries and Townshend 1994	16 dias	0,5 x 0,5 km
	Índice de vegetação normalizado melhorado EVI	0-1	MOD13Q1.061	Turner et al. 1999	16 dias	0,5 x 0,5 km
	Fluorescência de clorofila induzida pelo sol (SIF)	W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹	NASA OCO-2	O'Dell et al., 2012	16 dias	1,0 x 2,25 km
Ambientais	Precipitação acumulada	mm	Terra Climate	Abatzoglou et al., 2018	mensal	4,6 x 4,6 km
	Umidade do solo	0-1	Terra Climate	Abatzoglou et al., 2019	mensal	4,6 x 4,6 km
	Evapotranspiração de referência	mm	Terra Climate	Abatzoglou et al., 2018	mensal	4,6 x 4,6 km
	Radiação solar global	W/m ²	Terra Climate	Abatzoglou et al., 2018	diário	4,6 x 4,6 km
	Temperatura mínima	°C	Terra Climate	Abatzoglou et al., 2018	diário	4,6 x 4,6 km
	Temperatura máxima	°C	Terra Climate	Abatzoglou et al., 2018	diário	4,6 x 4,6 km
	Temperatura dia	°C	MOD11.A2.006	Julien et al. 2006; Imhoff et al. 2010	8 dias	1,0 x 1,0 km
	Temperatura noite	°C	MOD11.A2.006	Julien et al. 2006; Imhoff et al. 2010	8 dias	1,0 x 1,0 km
	Albedo	0-1	MODTBGA	Boschetti et al, 2015	diaria	1,0 x 1,0 km

2.2.3. Análise dos dados

Foram realizadas análises estatísticas descritivas, análises de correlação, e regressão linear para identificar as relações das variáveis ao longo do tempo, além de análises de agrupamento para identificar os pontos de concentração de xCO₂ comuns na Patagônia Argentina (Figura 7). A organização prévia da matriz de dados foi realizada utilizando o Software R versão 4.2.0 (R Core Team, 2021). Para todas as variáveis estudadas, foram aplicados testes de normalidade (p.e. Shapiro-Wilk) e testes de homocedasticidade. Nos casos em que os dados não seguiram uma distribuição normal, optou-se pelo teste Kruskal-Wallis em vez do teste t. As séries temporais das diferentes variáveis foram submetidas a cálculos de média, desvio padrão, valor mínimo e valor máximo.

Foram realizadas análises de correlação e regressão linear entre $x\text{CO}_2$ e as variáveis ambientais como SIF, NDVI, temperaturas, precipitação, umidade do solo, ET_0 , albedo e radiação incidente. Foi realizada a correlação de Spearman, que não pressupõe distribuição normal. Além de examinar a relação temporal entre a precipitação e o $x\text{CO}_2$ em escala mensal, também foram avaliados os efeitos da precipitação anterior à concentração atmosférica de CO_2 , realizando a correlação entre as séries de dados mensais de $x\text{CO}_2$ e as séries temporais de precipitação acumulada nos períodos que variam de dois a doze meses anteriores aos dados mensais de $x\text{CO}_2$.

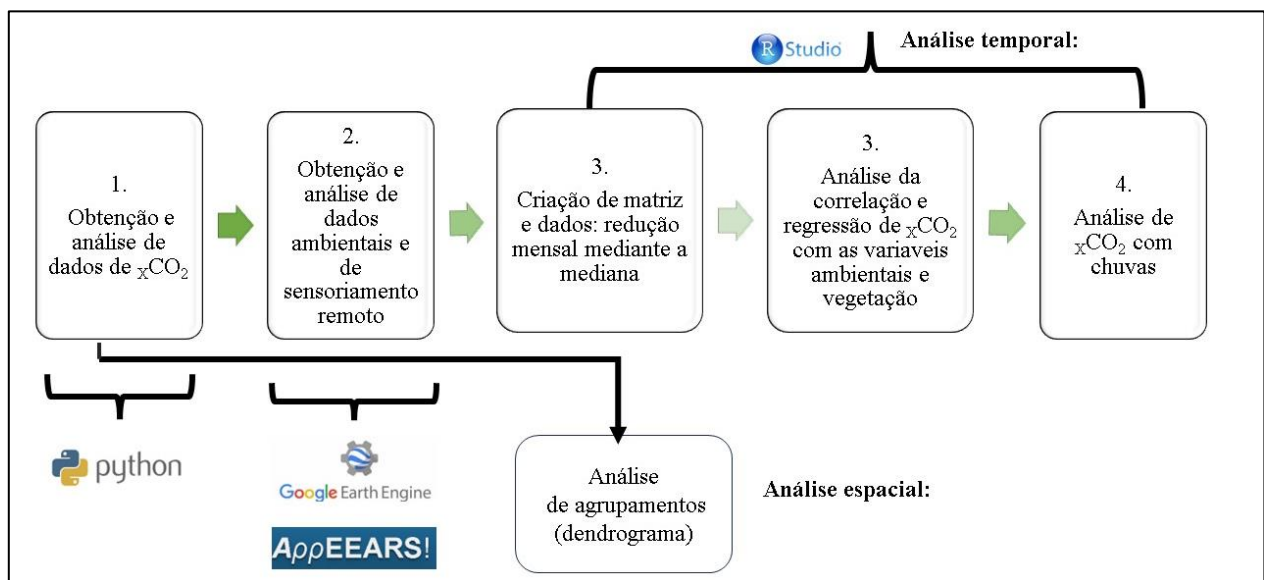


Figura 7. Fluxo de trabalho do análise espacial e temporal.

Adicionalmente, para as análises espaciais de CO_2 atmosférico e identificação de pontos comuns de $x\text{CO}_2$ na Patagônia Argentina, utilizou-se o método de cluster empregando o algoritmo de agrupamento K-Means. Esse algoritmo classifica cada ponto de $x\text{CO}_2$ com base em seu coeficiente de regressão no modelo GWR (Geographically Weighted Regression) (Li *et al.*, 2019). O algoritmo K-Means é um método de agrupamento que se baseia na similaridade de atributos e na distância euclidiana. Busca criar N clusters distintos, minimizando a distância entre membros dentro do mesmo cluster, enquanto maximiza a distância entre clusters (Jain, 2010). O valor de N, representa o número ideal de clusters para o modelo, geralmente é determinado usando a soma dos quadrados do modelo (Li *et al.*, 2019). Neste caso, agrupamos os pontos de

xCO₂ com base nos valores mensais de Setembro de 2014 a Dezembro de 2019. Esse procedimento gera um diagrama semelhante a uma árvore, conhecido como dendrograma, que ilustra as relações entre todas as amostras com base em uma medida definida de similaridade.

2.3 Resultados e discussões

O valor médio de xCO₂ na Patagônia foi de $399,45 \pm 0,15$ (erro padrão) ppm, com um intervalo mínimo e máximo de 397,5 e 401,5 ppm, respectivamente (Figura 8). É importante destacar que o valor médio de xCO₂ na Patagônia é inferior ao registrado em alguns ecossistemas, como por exemplo no Brasil. Em Pradópolis (cultivos de cana-de-açúcar) município do Estado de São Paulo no Brasil, foi observada uma média de 403,16 ppm por Moraes Filho *et al.* (2021). Esse valor elevado pode ser atribuído à intensa atividade agrícola na região, incluindo a queima de resíduos agrícolas durante os períodos de não crescimento das culturas. Outra área com valores elevados de xCO₂ é o cultivo de pastagens no município de Águas Claras, no Estado de Mato Grosso do Sul, que apresentou uma média de 403,7 ppm (Moraes Filho *et al.*, 2021). Essa região é conhecida por suas extensas áreas de pastagem para o gado de corte, e as emissões resultantes da decomposição do material orgânico contribuem para níveis elevados de CO₂ atmosférico.

Por outro lado, ecossistemas com valores inferiores de xCO₂ atmosférico incluem as áreas de pastagens do bioma do Cerrado brasileiro, onde a pastagem degradada apresentou média de 393,4 ppm, e pastagens manejadas média de 393,3 ppm (Odorizzi *et al.*, 2022). Esses ecossistemas podem estar mais preservados e menos afetados por atividades humanas intensivas, como a agricultura em grande escala. Além disso, na região amazônica oriental e transições com outros biomas como o Cerrado e a Catinga, no Estado do Maranhão, registrou valores relativamente baixos de xCO₂, com uma média de 393,15 ppm (Santos *et al.*, 2022). As informações do xCO₂ nos proporcionam uma visão geral de estado dos diferentes ecossistemas que pode ser atribuída a uma combinação de fatores, incluindo práticas agrícolas específicas, grau de preservação da vegetação natural e variações ambientais na região.

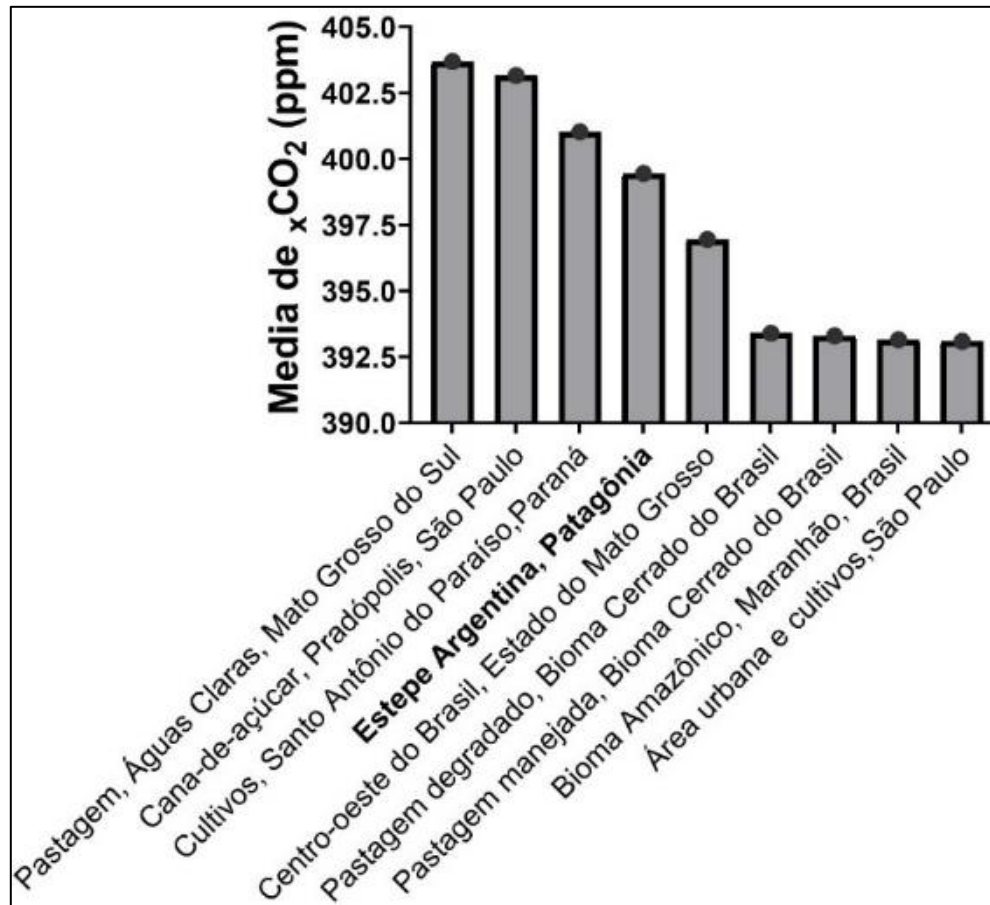


Figura 8. Valor médio do xCO_2 na Patagônia Argentina e outros ecossistemas naturais e manejados com diferentes usos e ocupação do solo.

2.3.1 Padrões temporais do xCO_2 e variáveis vegetativas NDVI, EVI, SIF na Patagônia

Os resultados revelam uma marcada sazonalidade para xCO_2 , NDVI, EVI e SIF na Patagônia Argentina (Figura 9). A série temporal de xCO_2 apresentou os maiores valores entre Junho e Setembro (inverno austral) e os menores valores entre Novembro e Março (verão austral). Em contraste, os índices de vegetação (NDVI e EVI) e o SIF também exibem sazonalidade durante a série temporal, mas o comportamento é inverso quando comparado a xCO_2 (Figura 9), enquanto o NDVI e EVI atingem os maiores valores entre Novembro e Fevereiro e os menores valores entre Junho e Setembro (Figura 9 a, b). Esse mesmo padrão para xCO_2 e os índices de vegetação tem sido observado em estudos conduzidos em outras formas de cobertura vegetal como as culturas agrícolas

(cana de açúcar e soja) e pastagens manejadas em regiões tropicais e subtropicais (Morais Filho *et al.*, 2021; Da Costa *et al.*, 2022). A variabilidade sazonal do NDVI para a Patagônia Argentina, abordada neste estudo, está em conformidade com vários autores que descrevem que a fenologia da vegetação nestas latitudes é mais intensa no verão, entre Novembro e Março (Paruelo *et al.*, 1993; Baldi *et al.*, 2008). Além dos índices de vegetação, o SIF também apresenta uma sazonalidade marcada (Figura 9 c). Os valores médios de SIF foram 0,025, com valor mínimo de 0,01 (inverno) e máximo de 0,04 $\text{mWm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ (verão). Ao comparar os valores do SIF do verão, observa-se que estes são quatro vezes superiores aos encontrados no inverno. Essa maior emissão de fluorescência durante a atividade fotossintética (Frankenberg *et al.*, 2014) é observada especialmente durante o verão (Setembro até Março) mesmo que neste período ocorram os menores valores de precipitação na região (Castañeda e González 2008).

A variabilidade sazonal inversa entre o xCO_2 e os índices de vegetação e o SIF ao longo da série temporal (Figura 9) é respaldada pela análise de correlação de Spearman (Figura 11). Onde a análise revelou uma relação inversa robusta ($p < 0,05$) entre o xCO_2 e os índices de vegetação, como o EVI (-0,55), NDVI (-0,27), e a fluorescência induzida pelo sol, SIF (-0,24), indicando uma redução nas concentrações de CO_2 atmosférico à medida que a vegetação se torna mais ativa. Porém, sugere que a vegetação desempenha um papel crucial como sumidouro de CO_2 atmosférico, absorvendo o CO_2 da atmosfera por meio da cobertura vegetal (Ahlstrom *et al.*, 2015; Da Costa *et al.*, 2022) (Figura 11). Os resultados sobre a relação inversa entre o xCO_2 e os índices de vegetação e o SIF, são coerentes com observações em outras regiões do mundo, elucidando o papel da vegetação na absorção do CO_2 atmosférico (Shekhar *et al.*, 2020; Moraes Filho *et al.*, 2021).

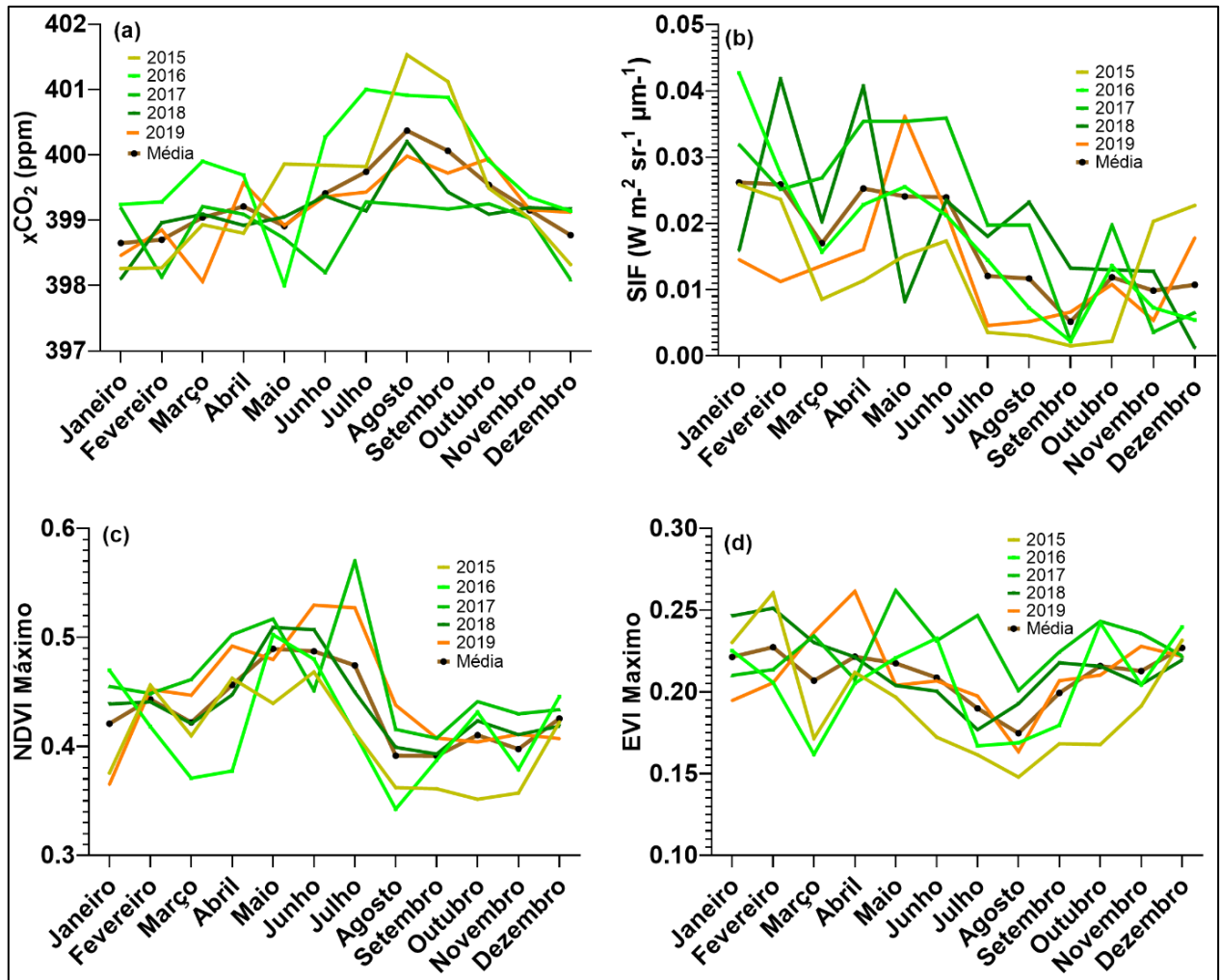


Figura 9. Series do tempo das variáveis de vegetação de: **(a)** xCO_2 **(b)** SIF ($mWm^{-2}sr^{-1}nm^{-1}$) **(c)** NDVI, **(d)** EVI, ao longo do período de estudo para a Patagônia Argentina.

2.3.2 Padrões temporais de xCO_2 e demais variáveis ambientais

Na Figura 10, observa-se também uma marcada sazonalidade para as variáveis ambientais relacionadas com o balanço hídrico (precipitação, umidade do solo, evapotranspiração de referência) (Figura 10 a-c) e o balanço de energia (radiação incidente, albedo, temperaturas diurna, noturna, mínima, máxima)(Figura 10 d-i) na Patagônia Argentina. De maneira geral, a precipitação e a umidade do solo mensal, apresentam os maiores valores durante o inverno e os menores valores durante o verão (Figura 10 a-b). No entanto, a precipitação varia consideravelmente entre os diferentes

anos (Figura 10 a). A umidade atinge os maiores valor de maio a julho, começando a declinar rapidamente até dezembro (Figura 10 b). Entretanto, a sazonalidade da precipitação, umidade do solo e a concentração maior das chuvas durante o inverno austral, conforme revelado em os resultados, está em concordância com diversos estudos que indicam a baixa pluviosidade na Patagônia Argentina, com valores inferiores a 200 mm/ano durante esse período (Castañeda e González 2008; González, 2013). Apesar da sazonalidade semelhante entre o $\times\text{CO}_2$ e a precipitação, umidade do solo mensal, não encontramos relação significativa entre essas variáveis (Figura 11). Caso contrário acontece com a chuva acumulada dos meses anteriores, onde a análise revelou uma correlação de Spearman inversa robusta entre o $\times\text{CO}_2$ e as variáveis: precipitação acumulada nos últimos 11 meses, PP.11 (-0,36), e umidade do solo nos últimos oito meses, umid.8 (-0,35) ($p < 0,05$). No entanto, a análise mais aprofundada foi abordada na seção 2.3.3.

Por outro lado, as variáveis de radiação incidente, albedo, ET_0 e as temperaturas diurna, noturna, mínima, máxima apresentam os maiores valores durante o verão e os menores valores durante o inverno (Figura 10 c-i). A sazonalidade dessas variáveis na Patagônia Argentina está associada à maior radiação incidente disponível durante o verão no hemisfério sul (Jobbágy *et al.*, 2002; Carbonell-Silletta *et al.*, 2022). Sobre a radiação incidente e as temperaturas, observamos que esse mesmo padrão temporal têm sido observado em algumas regiões da Patagônia Argentina (Jobbágy *et al.*, 2002). No entanto, foram observadas relações diretas entre o $\times\text{CO}_2$ e a amplitude da temperatura superficial (LST Amplitude)(Odorizzi *et al.*, 2022) relacionado como o grau de degradação das pastagens na região central do Brasil. A variabilidade sazonal inversamente proporcional do $\times\text{CO}_2$ e as variáveis de radiação incidente, albedo, ET_0 e as temperaturas ao longo da série temporal (Figura 9) também é explicada pela análise de correlação de Spearman (Figura 11). Assim, apresentam correlações negativas significativas, destacando-se a forte relação inversa entre o $\times\text{CO}_2$ e a temperatura noturna (-0.56), temperatura mínima (-0.54), temperatura máxima (-0.51), temperatura diurna (-0.49), ET_0 (-0.43) e radiação incidente (-0.43). Isso indica uma redução nas concentrações de CO_2 atmosférico à medida que existe maior disponibilidade de energia, e consequentemente

a vegetação se torna mais ativa e captura o CO_2 atmosférico. Entretanto, sugere também que a vegetação, utilizando uma maior disponibilidade de energia durante o verão, desempenha um papel crucial na captura do CO_2 da atmosfera (Jobbágy *et al.*, 2002). No entanto, esses processos não são fáceis de entender. Por exemplo, Davidson *et al.* (1998) discutem a dificuldade em distinguir separadamente os efeitos da temperatura e de outras variáveis como a umidade do solo e as chuvas. Além disso, alguns estudos indicam relações diretas entre que o aumento do CO_2 atmosférico e a temperatura em vários ecossistemas (Xu e Shang 2016).

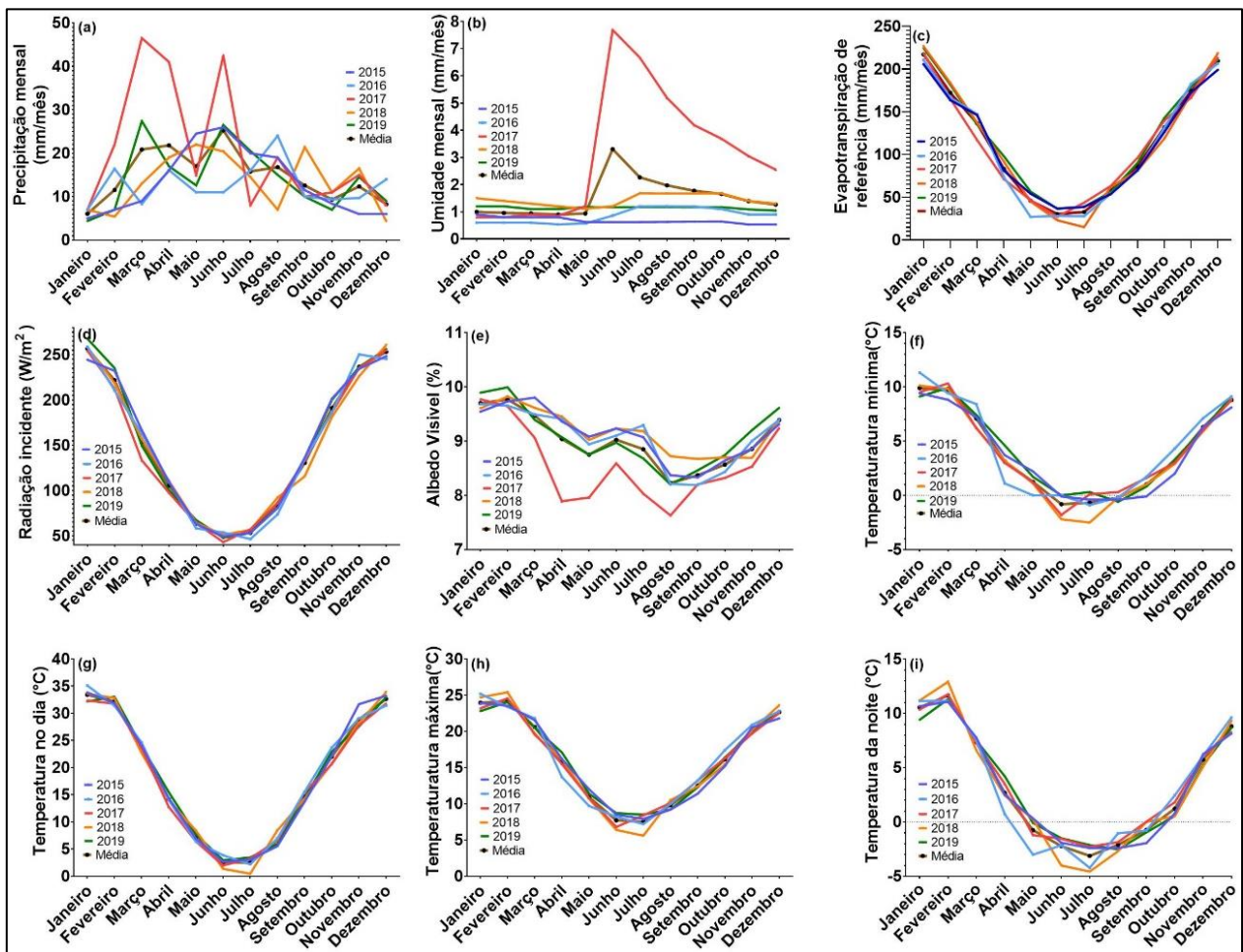


Figura 10. Séries temporais de variáveis ambientais na Patagônia Argentina, as variáveis são: **(a)** Precipitação mensal (mm/mês). **(b)** Umidade do solo mensal (mm/mês). **(c)** Evapotranspiração de referência (mm/mês). **(d)** Radiação incidente em W/m^2 . **(e)** Albedo (%). **(f)** Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$). **(g)** Temperatura média do dia ($^{\circ}\text{C}$). **(h)** Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$). **(i)** Temperatura média da noite ($^{\circ}\text{C}$).

A matriz de correlação de Spearman (Figura 11) e o análise de regressão (Figura 12) revelaram importantes relações entre as concentrações de xCO_2 e as variáveis ambientais na Patagônia Argentina. Na Figura 12, apresentamos os gráficos e as equações de regressão linear entre o xCO_2 e as variáveis ambientais na Patagônia Argentina. Os resultados sugerem que, no âmbito das variáveis relacionadas à vegetação, diferentes inclinações da reta foram observadas nas equações que representam o SIF, o EVI e o NDVI. A equação para SIF ($Y = 400 - 18.1X$) apresentou a maior inclinação da reta, sugerindo uma correlação significativa e negativa entre o SIF e as concentrações de CO_2 atmosférico. Um aumento na atividade vegetativa está associado a uma significativa diminuição nas concentrações de CO_2 . Algo semelhante foi observado para EVI ($Y = 403 - 16.8X$) e NDVI ($Y = 401 - 4.89X$), que demonstraram relações inversamente proporcional, ressaltando a importância desses índices na explicação das variações nas concentrações de CO_2 . Além disso, entre as variáveis de energia incidente e temperaturas, as maiores inclinações da reta foram associadas à temperatura da noite (T_{noite}), temperatura do dia (T_{dia}) e radiação incidente (rad). A equação para T_{noite} ($Y = 400 - 0.0856X$) revelou a maior influência, indicando uma relação inversa significativa entre a temperatura noturna e as concentrações de CO_2 . Em suma, os resultados destacam a complexidade das interações entre o CO_2 atmosférico e as variáveis ambientais na Patagônia Argentina, evidenciando a influência não apenas do componente da vegetação, mas também da umidade do solo, radiação incidente e as temperaturas na dinâmica do CO_2 atmosférico na região.

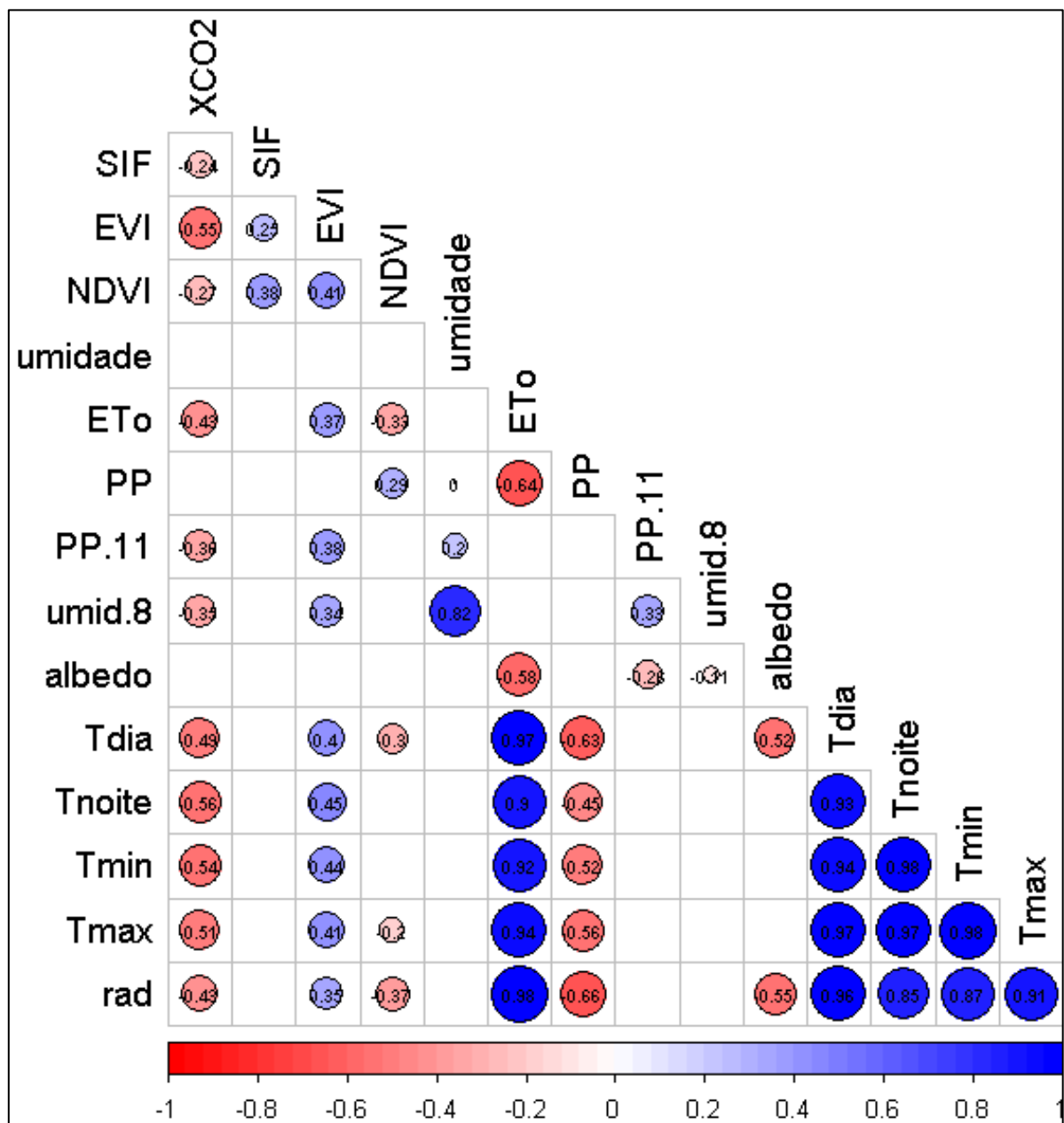


Figura 11. Matriz de correlação entre xCO₂ e as variáveis ambientais na Patagônia Argentina, tais como: índice de vegetação aprimorado (EVI), índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), fluorescência induzida pelo sol (SIF), umidade do solo (umidade), ETo (Evapotranspiração de referência), PP (precipitação), PP.11 (precipitação acumulada nos últimos 11 meses), umid.8 (umidade do solo dos últimos oito meses), albedo, temperatura no dia (Tdia), temperatura da noite (Tnoite), temperatura mínima (Tmin), temperatura máxima (Tmax), radiação incidente (rad). As caixas brancas na matriz indicam que as correlações não alcançaram significância estatística.

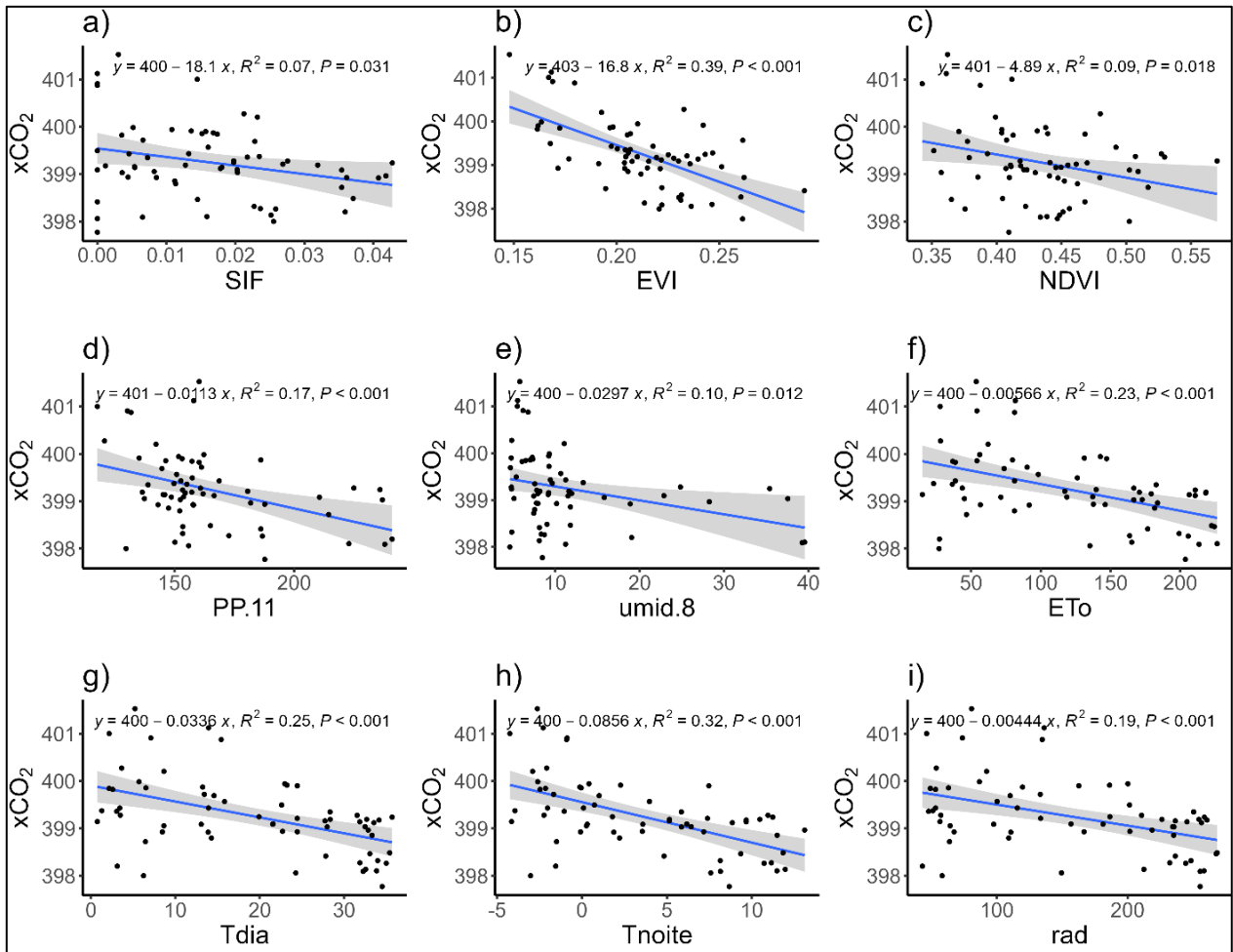


Figura 12. Dispersão e regressão linear de xCO_2 com as variáveis ambientais na Patagônia Argentina, tais como: **(a)** fluorescência induzida pelo sol (SIF), **(b)** índice de vegetação aprimorado (EVI), **(c)** índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), **(d)** precipitação acumulada nos últimos 11 meses (PP.11), **(e)** umidade do solo dos últimos oito meses (umid.8), **(f)** evapotranspiração de referência (ETo), **(g)** temperatura no dia (Tdia), **(h)** temperatura da noite (Tnoite), **(i)** radiação incidente (rad).

2.3.3 Relação entre xCO_2 e a precipitação acumulada na Patagônia Argentina

No presente estudo, não encontrou-se uma relação direta entre a precipitação e o xCO_2 em escala mensal. No entanto, observou-se uma relação direta significativa entre a concentração atmosférica de CO_2 e a precipitação acumulada dos primeiros meses e uma relação inversa significativa entre o xCO_2 e a precipitação acumulada dos últimos meses (Figura 13 a , b).

Foi observado a relação direta significativa entre a concentração atmosférica de CO₂ e a precipitação acumulada nos primeiros meses, especificamente entre os segundo e o sétimo mês e, atingindo sua correlação máxima nos meses três a quatro de precipitação acumulada (Figura 13). Essa observação sugere uma possível associação com a atividade respiratória do solo (Day *et al.*, 2022). A umidade e a disponibilidade de água a curto prazo, provenientes das chuvas, contribuem para criar um ambiente propício à atividade microbiana, incrementando, assim, a taxa de decomposição da matéria orgânica presente no solo e podendo resultar na liberação de CO₂ para a atmosfera (Austin e Ballaré, 2010). A relação direta entre as emissões de CO₂ atmosférico e a precipitação nos primeiros meses (Figura 13b) também abre espaço para a exploração de outros processos físicos, como a fotodegradação e fotomineralização, comuns em ecossistemas semiáridos (Berenstecher *et al.*, 2020; Méndez *et al.*, 2019) e áridos (Asao *et al.*, 2018; Day *et al.*, 2019). Estes processos revelam efeitos diretos e indiretos da radiação solar na decomposição microbiana, resultando em aumento da respiração e, subsequentemente, no aumento das emissões de CO₂ atmosférico. Como efeitos indiretos temos que a radiação incidente pode acelerar a decomposição da matéria orgânica da vegetação, alterando sua composição química e tornando-a mais acessível aos micróbios, intensificando os processos de respiração e, conseqüentemente, as emissões de CO₂ atmosférico (King *et al.*, 2012). Além disso, como efeito direto na exposição da matéria orgânica vegetal à radiação solar, com diferentes comprimentos de onda, pode ocasionar a quebra direta de constituintes da parede celular vegetal, como a lignina (Austin e Ballaré, 2010), celulose e hemicelulose (Ruhland *et al.*, 2019; Cuadra *et al.*, 2020), gerando compostos voláteis e não voláteis, incluindo o CO₂, que são liberados para a atmosfera (Austin e Ballaré, 2010; Day e Bliss, 2020). Além disso temos a hipótese de que a fotodegradação, seguida pela ocorrência de chuvas, emerge como mecanismo sinérgicos na perda de massa de matéria orgânica vegetal em ecossistemas áridos e conseqüentemente as emissões de CO₂ na atmosfera (Austin e Vivanco, 2006). Contudo, o aumento das emissões de CO₂ atmosférico não se manifestam se a matéria orgânica vegetal não tivesse sido previamente exposta à radiação solar antes das chuvas (Day *et al.*, 2022).

Sobre a relação inversa significativa entre o ΔCO_2 e a precipitação acumulada de períodos prévios, mas longos, principalmente a chuva acumulada de 10 e 11 meses prévios (Figura 13 b). A melhor explicação para tal fenômeno está relacionada à composição florística e estrutural da Patagônia Argentina, que pode reagir de maneira distinta ao efeito da precipitação sobre a capacidade de captura e emissão de CO_2 . Por exemplo, certas espécies vegetais podem ser mais resilientes à seca e capazes de crescer em ambientes áridos com escassez de água, enquanto outras requerem maior quantidade de água para seu desenvolvimento. Nesse contexto, apenas a acumulação de água pode exercer um efeito maior no crescimento da vegetação e na captura de CO_2 atmosférico (Paruelo e Lauenroth 1995; Silletta *et al.*, 2019). Esses resultados são apoiados fortemente, pela relação observada entre o NDVI e a precipitação cumulativa de períodos prévios na Patagônia Argentina (Fabricante *et al.*, 2009), que foi apresentado a variação espacial e temporal significativa do NDVI como função das chuvas acumuladas de meses prévios (Figura 14).

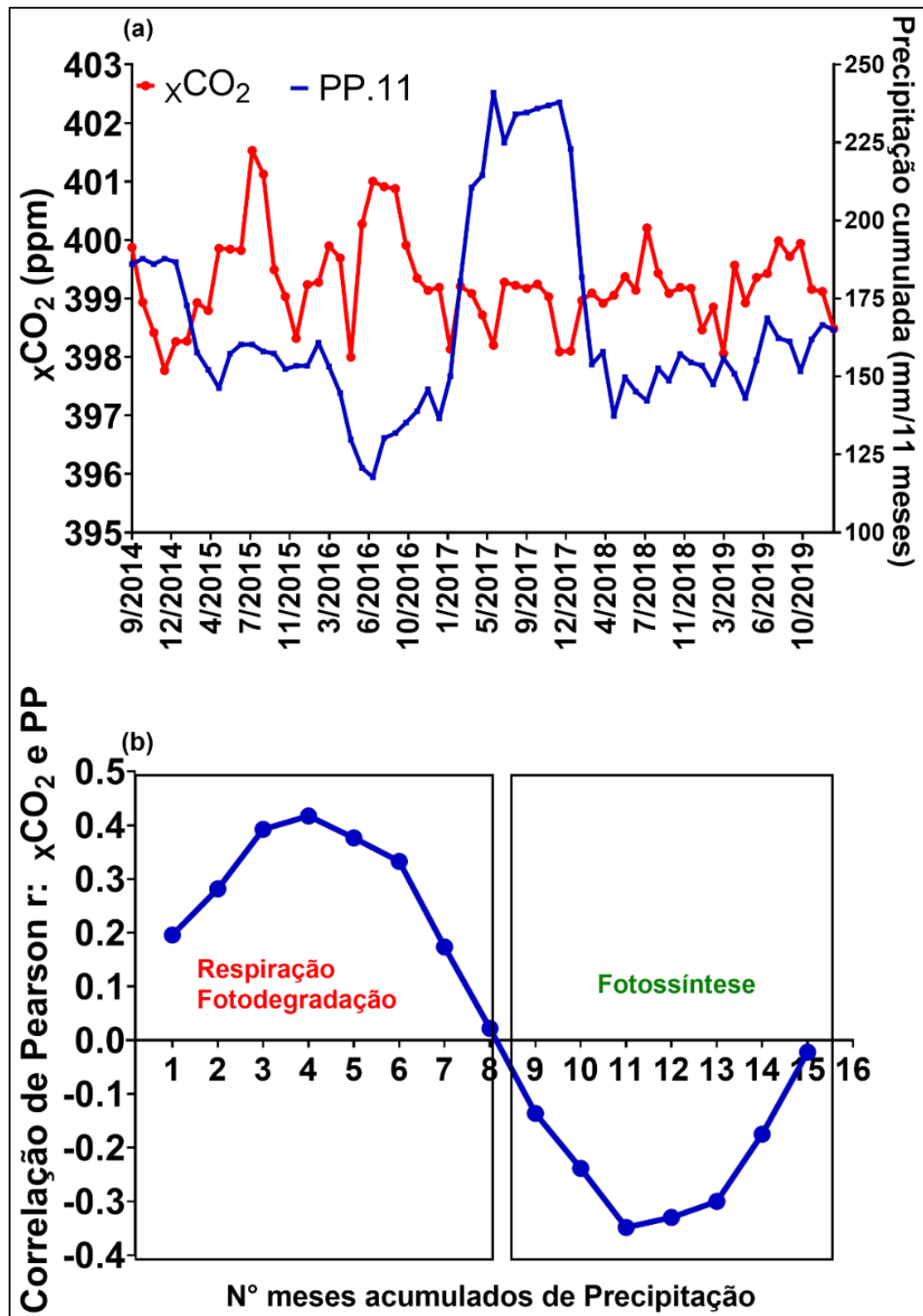


Figura 13.(a). Série temporal do xCO₂(ppm) e da precipitação(mm) acumulada dos últimos meses para a Patagônia Argentina, no período de 2014-2020.**(b).** Relação do índice de correlação de Pearson entre o xCO₂e a precipitação acumulada para diferentes períodos mensais de precipitação previa.

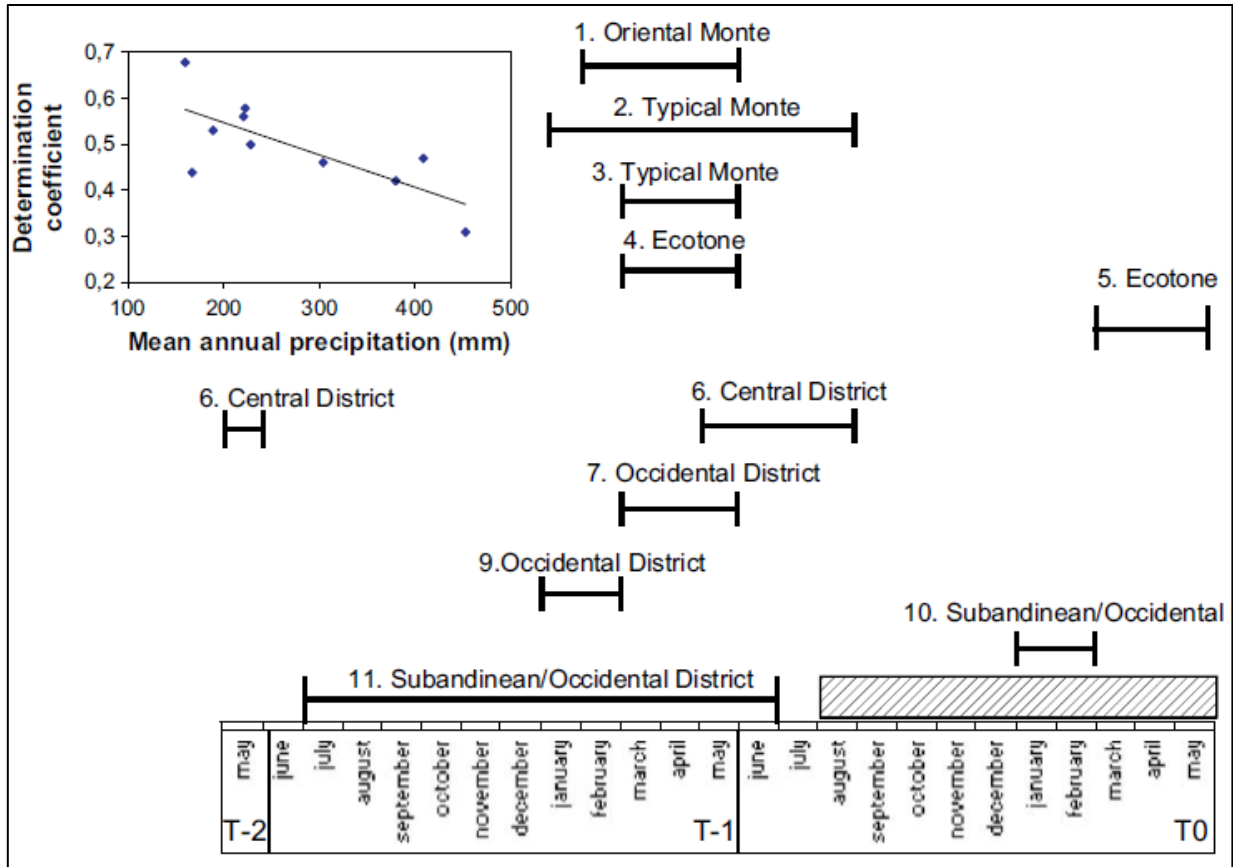


Figura 14. Correlação entre o NDVI/Produtividade primária bruta e a precipitação acumulada na Patagônia Argentina de acordo a Fabricante *et al.* (2019).

2.3.4 Análise espacial de CO₂ atmosférico na Patagônia Argentina

A Figura 15 apresenta os cinco grupos semelhantes de concentração de CO₂ atmosférico identificados por meio da análise de agrupamento, utilizando os valores mensais de xCO₂ da série temporal entre setembro de 2014 e janeiro de 2020, com N= 52 . O grupo 1 (N=26) corresponde à região leste do Planalto Central e ao Monte Austral (Figura 15; 6). Este grupo inclui também as pastagens o Golfo de San Jorge (da região ocidental Patagônia Argentina) (Figura 15; 6). O Grupo 2 (N=5) refere-se ao noroeste do Planalto Ocidental, próximo à Cordilheira dos Andes na região Subandina. O Grupo 3 (N=10) abrange a região oeste do Planalto Ocidental e do Planalto Central. Além disso,

inclui a Estepa Magallánica Úmida (EMU) e a Estepa Magallánica Seca (SEM) (Figura 15). O Grupo 4 (N=2), corresponde à região centro-oeste da Patagônia Argentina, incluindo a região oeste do Planalto Ocidental e a região das Pastagens Subandinas (Figura 15). Por fim, o Grupo 5 (N=8) abrange a região sudoeste do Planalto Central, além da Estepa Magallánica Úmida (EMU) e a Estepa Magallánica Seca (EMS).

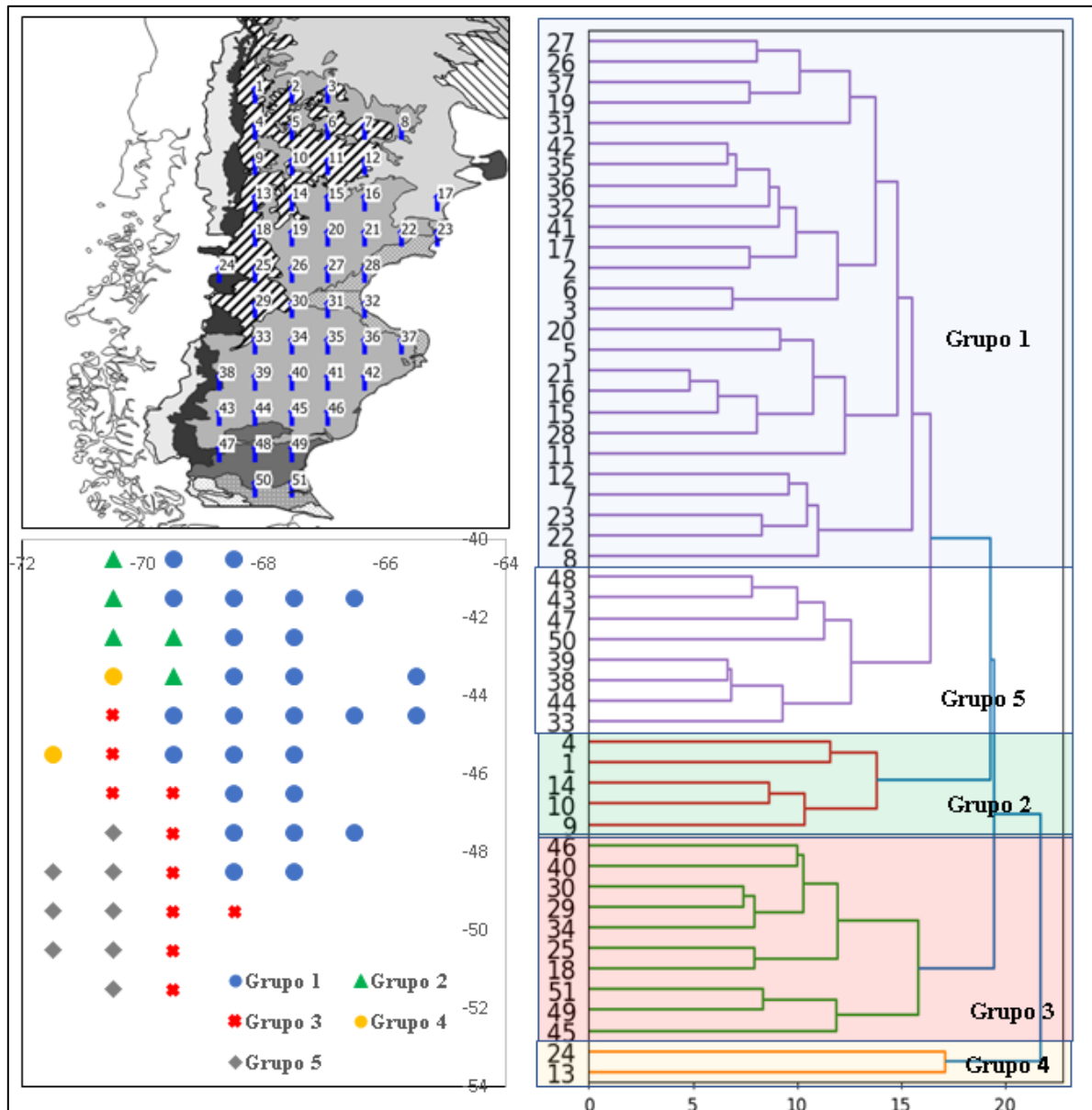


Figura 15. Representação dos cinco grupos de xCO_2 obtidos mediante o análise de cluster. Utilizando os valores mensais de xCO_2 da série de tempo entre setembro de 2014 e janeiro de 2020 na Patagônia Argentina.

Sobre concentração atmosférica de CO₂ nos cinco grupos identificados na Patagônia Argentina (Figura 16 a, b), observa-se que o Grupo 1 registra a maior média, com um valor de 399,77 ppm, enquanto o Grupo 3 apresenta a menor média, com 399,13 ppm. O Grupo 1 corresponde ao Planalto Central, onde a vegetação geralmente se apresenta como uma estepe de arbustos baixos e baixa cobertura vegetal (20 - 30%) (Klimisch *et al.*, 2022) em uma região dominada por desertos de espécies efêmeras. Este grupo também inclui as pastagens e arbustos da costa do Golfo de San Jorge, onde as condições climáticas são moduladas pelo oceano, apresentando arbustos altos, podendo atingir três metros ou mais de altura (Buono *et al.*, 2020). O Grupo 3 abrange a região oeste do Planalto Ocidental e do Planalto Central, destaca-se neste contexto a Estepa Magallánica Úmida (MEU) e a Estepa Magallánica Seca (SEM). Na SEM, a vegetação oscila entre 50 - 70% de cobertura, dominada por *Festuca gracillima* e podendo apresentar arbustos isolados, além de gramíneas. No entanto, na EMH as precipitações variam de 200 a 400 mm durante o ano, com um máximo nos meses de verão contrariamente às demais regiões da Patagônia Argentina (Castañeda e González 2008; González 2013). Assim, a MEU, dominada pela gramínea *Festuca gracillima*, também faz parte do grupo 5, sendo uma explicação plausível para o baixo valor médio de xCO₂ e alta produtividade (Paruelo *et al.*, 2004). O grupo 2 abrange a região noroeste do Planalto Ocidental, próximo à Cordilheira dos Andes e a região Subandina, onde há presença de florestas densas, pastagens e gramíneas (Sottile *et al.*, 2015). Esses elementos podem explicar o maior desvio padrão encontrado para o grupo 2 (Figura 16 b).

A vasta extensão e diversidade da cobertura vegetal na Patagônia Argentina, que abrange florestas e pastagens, têm despertado crescente interesse no sequestro de carbono atmosférico e na mitigação das mudanças climáticas (Mazzonia e Vazquez 2009; Peri *et al.*, 2021). As arbóreas de crescimento lento possuem a capacidade de acumular carbono ao longo de décadas e até séculos (Sottile *et al.*, 2015). Da mesma forma, as pastagens densas, constituídas por espécies de crescimento rápido, podem capturar carbono e armazená-lo no solo a curto prazo (Peri *et al.*, 2015). Esses resultados evidenciam diferenças na concentração atmosférica de CO₂ entre as regiões da Patagônia Argentina, ressaltando a importância de monitorar e compreender tais

variações para avaliar o impacto ambiental, as possíveis influências das mudanças climáticas e as medidas de mitigação.

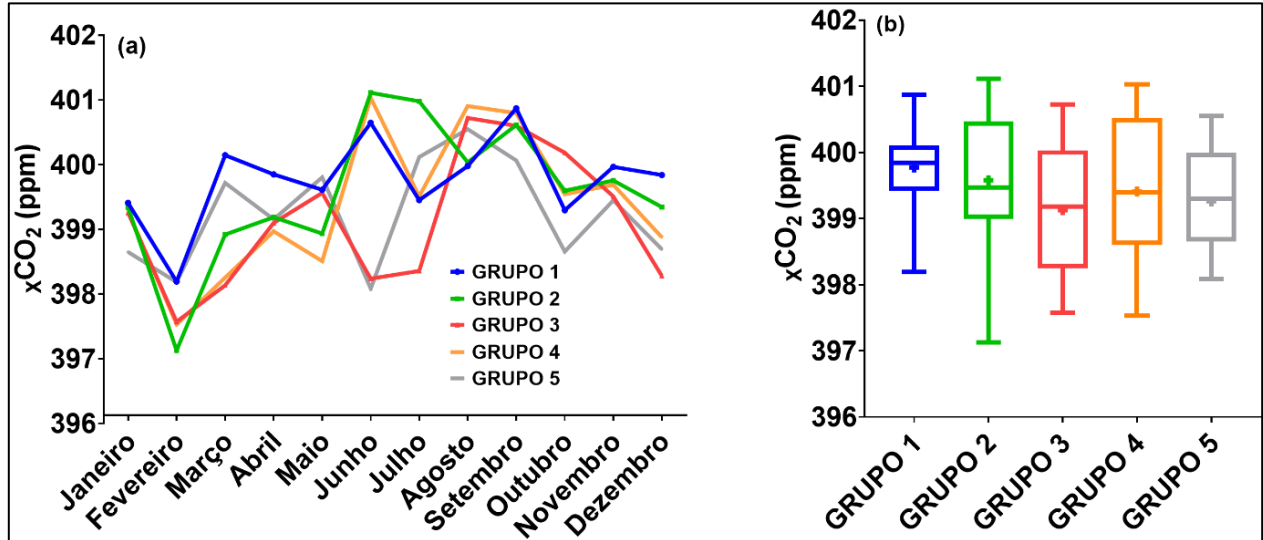


Figura 16. (a). Representação temporal dos valores de $x\text{CO}_2$ para cada grupo identificado por análise de agrupamento na Patagônia Argentina, abrangendo o período de Setembro de 2014 a Janeiro de 2020. **(b).** Gráfico de boxplot apresentando o valor médio de $x\text{CO}_2$ para cada grupo na Patagônia Argentina. A linha horizontal do boxplot representa a mediana da distribuição, a caixa inclui 50% dos dados e os bigodes atingem o valor mais alto e o mais baixo dentro de 95% da distribuição. Os pontos representam o valor médio da distribuição.

2.4 Conclusões

O $x\text{CO}_2$ apresenta uma relação inversa com os índices de vegetação, a inflorescência da clorofila induzida pelo sol (SIF) e as variáveis associadas à temperatura e a radiação na Patagônia Argentina.

O estudo revelou uma relação direta e inversa entre o $x\text{CO}_2$ e a precipitação acumulada, dependendo do número de meses acumulados de precipitação. Assim encontrou-se uma relação direta significativa entre o $x\text{CO}_2$ e a precipitação acumulada nos primeiros 3 a 4 meses, o que pode estar associado aos efeitos da respiração, radiação e chuvas na Patagônia Argentina. No entanto, identificamos uma relação inversa significativa entre o $x\text{CO}_2$ e a precipitação acumulada dos últimos 8 a 11 meses,

o que pode estar associada aos processos fotossintéticos e ao crescimento da vegetação na região.

Espacialmente, o presente estudo identificou 5 grupos espaciais de xCO_2 na Patagônia Argentina com base nos valores mensais da série temporal de Setembro de 2014 a Janeiro de 2020.

2.5 Referências

Abatzoglou JT, Dobrowski SZ, Parks SA, Hegewisch KC (2018) TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. **Scientific Data** 5:1–12.

Agosta EA, Martin PB, Serio LA (2019) Persistent easterly winds leading to precipitation in the Atlantic Coast of Patagonia. **International Journal of Climatology** 39:5063–5090.

Ahlstrom A, *et al.* (2015) The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO_2 sink. **Science** 348:895–899.

Allen RG, Periera LS, Raes D, Smith DM (Eds.) (1998) Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome, Italy: FAO, 300p.

AppEEARS, (2022) Disponível em: <<https://appeears.earthdatacloud.nasa.gov/>>. Acesso em: 6 julho 2022.

Asao S, Parton WJ, Chen MS, Gao W (2018) Photodegradation accelerates ecosystem N cycling in a simulated California grassland. **Ecosphere**, 9(8): e02370.

Austin AT, Vivanco L (2006) Plant litter decomposition in a semi-arid ecosystem controlled by photodegradation. **Nature** 442:555–558.

Austin AT, Ballaré CL (2010) Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems. **Proceedings of the National Academy of Sciences USA** 107(10): 4618–4622.

Austin AT, Yahdjian L, Stark JM, Belnap J, Porporato A, Norton U, Ravetta DA, Schaeffer SM (2004) Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems. **Oecologia** 141:221–235.

Baldassini P, Volante JN, Califano LM, Paruelo JM (2012) Regional characterization of the structure and productivity of the vegetation of the Puna using MODIS images. **Ecologia Austral** 22:22–32.

Baldi G, Noretto MD, Aragón R, Aversa F, Paruelo JM, Jobbágy EG (2008) Long-term satellite NDVI data sets: Evaluating their ability to detect ecosystem functional changes in South America. **Sensors** 8:5397–5425.

Berenstecher P, Vivanco L, Pérez LI, Ballaré CL, Austin AT (2020) Sunlight doubles aboveground carbon loss in a seasonally dry woodland in Patagonia. **Current Biology** 30(16):3243–3251.

Boschetti L, Vermote E, Wolfe R (2015) MODTBGA MODIS/Terra Thermal Bands Daily L2G-lite Global 1km SIN grid V006; NASA LP DAAC: Sioux Falls, SD, USA.

Buono GG, Utrilla VR, Nakamatsu VB, Villa MD (2020) Métodos de evaluación de los mallines patagónicos: Botanal y Pasturómetro. Ediciones INTA. In.: Massara PV, Buono, GB (Eds.) Métodos de evaluación de pastizales en Patagonia Sur. Ediciones INTA, Centro Regional Patagonia Sur Capítulo 9, p. 160- 188.

Cabello J, Alcaraz-Segura D, Ferrero R, Castro AJ, Liras E (2012) The role of vegetation and lithology in the spatial and inter-annual response of EVI to climate in drylands of Southeastern Spain. **Journal of Arid Environments** 79:76–83.

Carbonell-Sillett L, Cavallaro A, Pereyra DA, Askenazi JO, Goldstein G, Scholz FG, Bucci SJ (2022) Soil respiration and N-mineralization processes in the Patagonian steppe are more responsive to fertilization than to experimental precipitation increase. **Plant Soil** 479:405–422.

Castañeda M, González M (2008) Statistical analysis of the precipitation trends in the Patagonia region in southern South America. **Atmosfera** 21:303–317.

Crisp D *et al.* (2012) The ACOS CO₂ retrieval algorithm - Part II: Global xCO₂ data characterization. **Atmospheric Measurement Techniques** 5:687–707.

Cuadra P, Guajardo J, Carrasco-Orellana C, Stappung Y, Fajardo V, Herrera R (2020) Differential expression after UV-B radiation and characterization of chalcone synthase from the Patagonian hairgrass *Deschampsia antarctica*. **Phytochemistry** 169:112179.

Da Costa LM, de Araújo Santos GA, de Mendonça GC, Morais Filho LFF, de Meneses KC, de Souza Rolim G, La Scala Jr N (2022) Spatiotemporal variability of atmospheric CO₂ concentration and controlling factors over sugarcane cultivation areas in southern Brazil. **Environment, Development and Sustainability** 24:5694–5717.

Davidson EA, Belk E, Boone RD (1998) Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. **Global Change Biology** 4(2):217-227.

Day TA, Bliss MS (2019) A spectral weighting function for abiotic photodegradation based on photochemical emission of CO₂ from leaf litter in sunlight. **Biogeochemistry** 146(2):173–190.

Day TA, Urbine JM, Bliss MS (2022) Supplemental precipitation accelerates decay but only in photodegraded litter and implications that sunlight promotes leaching loss. **Biogeochemistry** 158(1):113–129.

Day TA, Bliss MS (2020) Solar photochemical emission of CO₂ from leaf litter: Sources and significance to C loss. **Ecosystems** 23:1344–1361.

Defries RS, Townshend JR (1994) NDVI-Derived Land Cover Classifications at a Global Scale. **International Journal of Remote Sensing** 15:3567–3586.

Fabricante I, Oesterheld M, Paruelo JM (2009) Annual and seasonal variation of NDVI explained by current and previous precipitation across Northern Patagonia. **Journal of Arid Environments** 73:745–753.

Frankenberg C, O'Dell C, Berry J, Guanter L, Joiner J, Köhler P, Pollock R, Taylor TE (2014) Prospects for chlorophyll fluorescence remote sensing from the Orbiting Carbon Observatory-2. **Remote Sensing of Environment** 147:1–12.

Gaitán JJ, López CR, Bran DE (2011) Vegetation composition and its relationship with the environment in mallines of north Patagonia, Argentina. **Wetlands Ecology and Management** 19:121–130

González MH, (2013) Some indicators of interannual rainfall variability in Patagonia (Argentina). In.: Tarhule A. (Eds.) *Climate Variability – Regional and Thematic Patterns*. Rijeka, Croatia, pp. 133-161.

Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R (2017) Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment** 202:18–27.

Gujarati DN, Porter DC (2011) *Econometria Básica-5*. Porto Alegre: AMGH, 2011. 924 p.

Imhoff ML, Zhang P, Wolfe RE, Bounoua L (2010) Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. **Remote Sensing of Environment** 114:504–513.

IPCC, (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud, N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, et al. (Eds) Cambridge University Press: Geneva, Switzerland.

Jain AK (2010) Data clustering: 50 years beyond K-means. **Pattern Recognition Letters** 31(8):651-666.

Jobbágy EG, Paruelo JM, León RJ (1995) Estimación del régimen de precipitación a partir de la distancia a la cordillera en el noroeste de la Patagonia. **Ecología** 5:47–53

Jobbágy EG, Sala OE, Paruelo JM (2002) Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: a remote sensing approach. **Ecology** 83:307–319.

Julien Y, Sobrino JA, Verhoef W (2006) Changes in land surface temperatures and NDVI values over Europe between 1982 and 1999. **Remote Sensing of Environment** 103:43–55.

King JY, Brandt LA, Adair EC (2012) Shedding light on plant litter decomposition: Advances, implications, and new directions in understanding the role of photodegradation. **Biogeochemistry** 111(1–3): 57–81.

Klimisch B, Maglione D, Paredes P, Soto J (2022) Análisis del Comportamiento de la Vegetación a partir de Índices del Sensor MODIS en Santa Cruz, Argentina. **Informes Científicos Técnicos - UNPA** 14(3):69–90.

Li Q, Wang Q, Li X (2019) An Efficient Clustering Method for Hyperspectral Optimal Band Selection via Shared Nearest Neighbor. **Remote Sensing** 11(3):350

Mazzonia E, Vazquez M (2009) Desertification in Patagonia. **Developments in Earth Surface Processes** 13:351–377.

Méndez MS, Martinez ML, Araujo PI, Austin AT (2019) Solar radiation exposure accelerates decomposition and biotic activity in surface litter but not soil in a semiarid woodland ecosystem in Patagonia, Argentina. **Plant Soil** 445:483–496.

Morais Filho LFF, Meneses KC de, Santos GA de A, da Silva Bicalho E, de Souza Rolim G, La Scala Jr N (2021) xCO₂ temporal variability above Brazilian agroecosystems: A remote sensing approach. **Journal of Environmental Management** 288(2):112433.

Mutiibwa D, Strachan S, Albright T (2015) Land Surface Temperature and Surface Air Temperature in Complex Terrain. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing** 8:4762–4774.

O'Dell CW, *et al.* (2012) The ACOS CO₂ retrieval algorithm-Part 1: Description and validation against synthetic observations. **Atmospheric Measurement Techniques** 5:99–121.

Odorizzi M, Pellegrino Cerri CE, La Scala N (2022) Atmospheric CO₂, soil carbon stock and control variables in managed and degraded pastures in central Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment** 28:100848.

Parente L, Mesquita V, Miziara F, Baumann L, Ferreira L. Assessing the pasturelands and livestock dynamics in Brazil, from 1985 to 2017: (2019). A novel approach based on high spatial resolution imagery and Google Earth Engine cloud computing. **Remote Sensing of Environment**. 232:111301.

Paruelo JM, Aguiar MR, Golluscio RA, León RJC, Pujol G (1993) Environmental controls of NDVI dynamics in Patagonia based on NOAA-AVHRR satellite data. **Journal of Vegetation Science** 4:425–428.

Paruelo JM, Beltran A, Jobbagy E, Sala OE, Golluscio RA (1998) The climate of Patagonia: General patterns and controls on biotic processes. **Ecologia Austral** 8:85–101

Paruelo JM, Golluscio RA, Guerschman JP, Cesa A, Jouve VV, Garbulsky MF (2004) Regional scale relationships between ecosystem structure and functioning: The case of the Patagonian steppes. **Global Ecology and Biogeography** 13:385–395.

Paruelo JM, Lauenroth WK (1995) Regional patterns of normalized difference vegetation index in North American shrublands and grasslands. **Ecology** 76:1888–1898.

Peri PL, Bahamonde H, Christiansen R (2015) Soil respiration in Patagonian semiarid grasslands under contrasting environmental and use conditions. **Journal of Arid Environments** 119:1–8.

Peri PL, Martínez-Pastur G, Nahuelhual L (Eds.) (2021) Ecosystem services in Patagonia. A multi-criteria approach for an integrated assessment. Switzerland: Springer **Nature**, 501p.

Peri PL, Rosas YM, Ladd B, Toledo S, Lasagno RG, Martínez Pastur G (2018) Modelling soil carbon content in South Patagonia and evaluating changes according to climate, vegetation, desertification and grazing. **Sustainability** (Switzerland) 10(2):438.

R Core Team (2021) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <https://www.R-project.org>

Ruhland CT, Niere JA (2019) The effects of surface albedo and initial lignin concentration on photodegradation of two varieties of *Sorghum bicolor* litter. **Scientific Reports** 9(1):18748.

Santos GA de A, Morais Filho LFF, Meneses KC de M, Da Silva Junior CA, De Souza Rolim G, La Scala Jr. N (2022) Hot spots and anomalies of CO₂ over eastern Amazonia, Brazil: A time series from 2015 to 2018. **Environmental Research** 215 (2):114379.

Shekhar A, Chen J, Paetzold JC, Dietrich F, Zhao X, Bhattacharjee S, Ruisinger V, Wofsy SC (2020) Anthropogenic CO₂ emissions assessment of Nile Delta using xCO₂ and SIF data from OCO-2 satellite. **Environmental Research Letters** 15:095010.

Silletta LC, Cavallaro A, Kowal R, Pereyra DA, Silva RA, Arias NS, Goldstein G, Scholz FG, Bucci SJ (2019) Temporal and spatial variability in soil CO₂ efflux in the patagonian steppe. **Plant Soil** 444:165–176.

Soriano A, Paruelo JM, Ecologia D De, Agronomía F De (1992) Biozones: Vegetation Units Defined by Functional Characters Identifiable with the Aid of Satellite Sensor Images. **Global Ecology and Biogeography** (3) 2:82–89.

Sottile GD, Meretta PE, Tonello MS, Bianchi MM, Mancini MV (2015) Disturbance induced changes in species and functional diversity in southern Patagonian forest-steppe ecotone. **Forest Ecology and Management** 353:77-86.

Sun Y *et al.* (2017) OCO-2 advances photosynthesis observation from space via solar-induced chlorophyll fluorescence. **Science** 358:6360.

Turner DP, Cohen WB, Kennedy RE, Fassnacht KS, Briggs JM (1999) Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. **Remote Sensing of Environment** 70:52–68.

Vogel B, Rostagno CM, Molina L, Antilef M, La Manna L (2022) Cushion shrubs encroach subhumid rangelands and form fertility islands along a grazing gradient in Patagonia. **Plant Soil** 475:623–643.

Xu M, Shang H (2016) Contribution of soil respiration to the global carbon equation. **Journal of Plant Physiology** 203:16–28.

Wang C, Caja J, Gómez E (2018) Comparison of methods for outlier identification in surface characterization. **Measurement** 117:312–325.

Yan K, Park T, Yan G, Liu Z, Yang B, Chen C, Nemani RR, Knyazikhin Y, Myneni RB (2016) Evaluation of MODIS LAI/FPAR product collection 6. Part 2: Validation and intercomparison. **Remote Sensing** 8(6):460.

Yu L, Wen J, Chang CY, Frankenberg C, Sun Y (2019) High-Resolution Global Contiguous SIF of OCO-2. **Geophysical Research Letters** 46:1449–1458.

Yu L, Wen J, Chang CY, Frankenberg C, Sun Y (2021) High Resolution Global Contiguous SIF Estimates from OCO-2 SIF and MODIS, Version 2. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA.

Zhang P, Bounoua L, Imhoff ML, Wolfe RE, Thome K (2014) Comparison of MODIS Land Surface Temperature and Air Temperature over the Continental USA Meteorological Stations. **Canadian Journal of Remote Sensing** 40:110–122.