

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 09/04/2024.

**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.

2.4 Conclusões

O xCO_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 xCO_2 e a precipitação acumulada, dependendo do número de meses acumulados de precipitação. Assim encontrou-se uma relação direta significativa entre o xCO_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 xCO_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.