

Integración de PiecewiseSEM en R para el estudio de la dinámica de los gases de efecto invernadero

Juan Manuel Piñeiro-Guerra ^{1,10,15}, Nuria A. Lewczuk ¹¹, Tomas Della Chiesa ^{1,13}, Patricia I. Araujo ², Martín Acreche ³, Carolina Alvarez ⁴, Carina R. Alvarez ¹², Jorge Chalco Vera ³, Costantini Alejandro ⁵, De Tellería J. ⁶, Marcos Petrusek ⁷, Carlos Piccinetti ⁶, Liliana Picone ⁹, Silvia I. Portela ⁸, Gabriela Posse ¹⁴, Seijo M. ⁹, Cecilia Videla ⁹, Laura Yahdjian ¹, and Gervasio Piñeiro ^{1,10}

¹IFEVA-CONICET-Universidad de Buenos Aires - Facultad de Agronomía, ²CONICET-INTA EEA Pergamino, ³INTA EEA Salta-CONICET, ⁴INTA Centro Regional Córdoba, EEA Manfredi, ⁵INTA CNIA Inst. de Suelos, ⁶INTA Inst. de Microbiología y Zoología Agrícolas, ⁷Departamento de Tecnología - Universidad Nacional de Luján, ⁸INTA EEA Pergamino, ⁹FCA, UNMDP, Balcarce. ¹⁰Departamento de sistemas ambientales - Facultad de Agronomía-UdelaR, ¹¹IPADS-CONICET-INTA Balcarce, ¹²Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, ¹³Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Catedra de Climatología y Fenología Agrícolas. ¹⁴INTA Inst. Clima y Agua. ¹⁵Modelización Estadística de Datos e Inteligencia Artificial-Centro Universitario Regional Este.

El óxido nitroso (N₂O) es un potente gas de efecto invernadero (GEI) con un potencial de calentamiento global 273 veces superior al CO₂ en un periodo de 100 años (IPCC 2021). Las actividades humanas han incrementado significativamente su concentración en la atmósfera, lo que contribuye al cambio climático y a la reducción de la capa de ozono. Las emisiones de N₂O provienen de los suelos, a través de complejos procesos biogeoquímicos dentro del ciclo del nitrógeno. Estos procesos están influenciados por una combinación de factores distales (como las características edafoclimáticas propias de los sitios) y proximales (como el contenido de nutrientes en el suelo y condiciones ambientales).

El desafío para cuantificar las emisiones de N₂O radica en su alta variabilidad tanto espacial como temporal. Los enfoques convencionales suelen emplear análisis de regresión múltiple utilizando paquetes de R como lme y nlme, que permiten evaluar el efecto de variables individuales o conjuntos de variables sobre las emisiones de N₂O. Sin embargo, estos métodos tienen limitaciones cuando se trata de captar las interacciones complejas entre múltiples variables. Aquí es donde el paquete piecewiseSEM (Lefcheck JS, 2016) ofrece una ventaja significativa.

Este paquete implementa el modelado de ecuaciones estructurales (SEM), una técnica estadística en auge en ecología, que permite integrar múltiples variables en una red causal y probar simultáneamente varias hipótesis. A través de SEM, no solo se pueden identificar los efectos directos (factores proximales) sobre las emisiones, sino también los efectos indirectos (factores distales), que pueden ser más difíciles de detectar con métodos tradicionales. Esta capacidad para modelar tanto relaciones directas como indirectas permite, por ejemplo, evaluar cómo variables como el uso del suelo afectan las emisiones de N₂O de manera indirecta, a través de su influencia en factores como el contenido de nitrógeno o la humedad del suelo.

En este estudio, se recopilaron datos de nueve sitios en Argentina que abarcan diversos usos del suelo, desde ecosistemas naturales hasta tierras agrícolas. Se utilizaron mediciones estandarizadas de GEI durante dos años para analizar la variabilidad en las emisiones de N₂O. El análisis mediante SEM reveló que el uso del suelo es un factor determinante que afecta directamente la disponibilidad de NO₃⁻ en el suelo, lo que a su vez modifica las emisiones de N₂O. Aunque los mecanismos subyacentes son similares entre

ecosistemas naturales y tierras agrícolas, la conversión de estos sistemas naturales a cultivos aumenta las emisiones debido a la mayor disponibilidad de NO_3^- y la creación de condiciones favorables para la desnitrificación, como mayor humedad y temperatura del suelo.

Este estudio resalta la importancia de utilizar herramientas como piecewiseSEM para desentrañar las complejas interacciones entre los factores que afectan las emisiones de N_2O . Gracias a este enfoque, se puede obtener una visión más integral de los procesos que regulan estas emisiones, ofreciendo información crucial para el desarrollo de estrategias efectivas de mitigación..

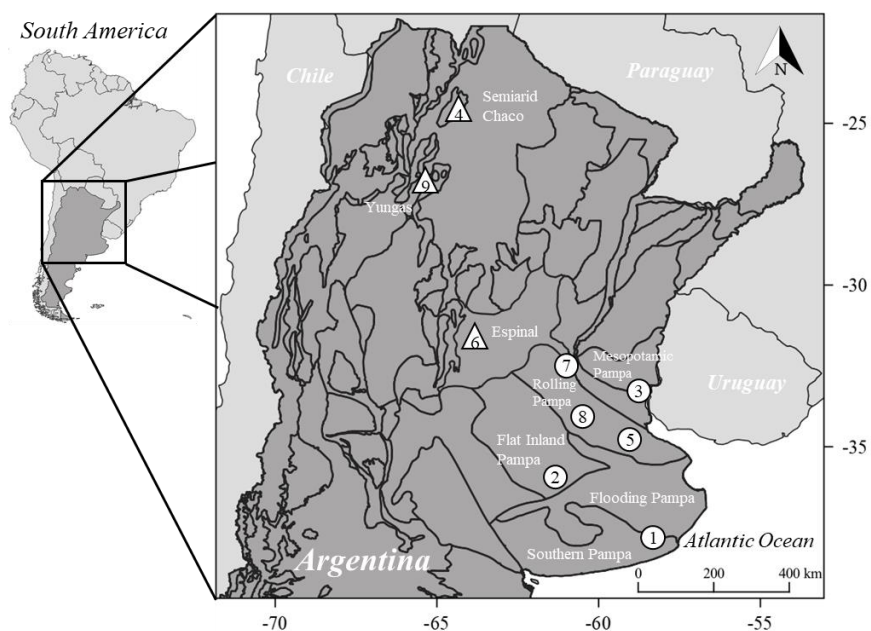


Figura 1. Mapa de los sitios experimentales. Los círculos y triángulos indican los sitios que tienen pastizales o bosques respectivamente. Los sitios están identificados con los números correspondientes 1: Balcarce, 2: C.Casares, 3: Gualeguaychú, 4: Lajitas, 5: Luján, 6: Manfredi, 7: Oliveros, 8: Pergamino y 9: Tucumán. Las unidades de vegetación fueron tomadas de Oyarzabal et al., 2018, sólo se identifican las unidades de vegetación con sitios experimentales.

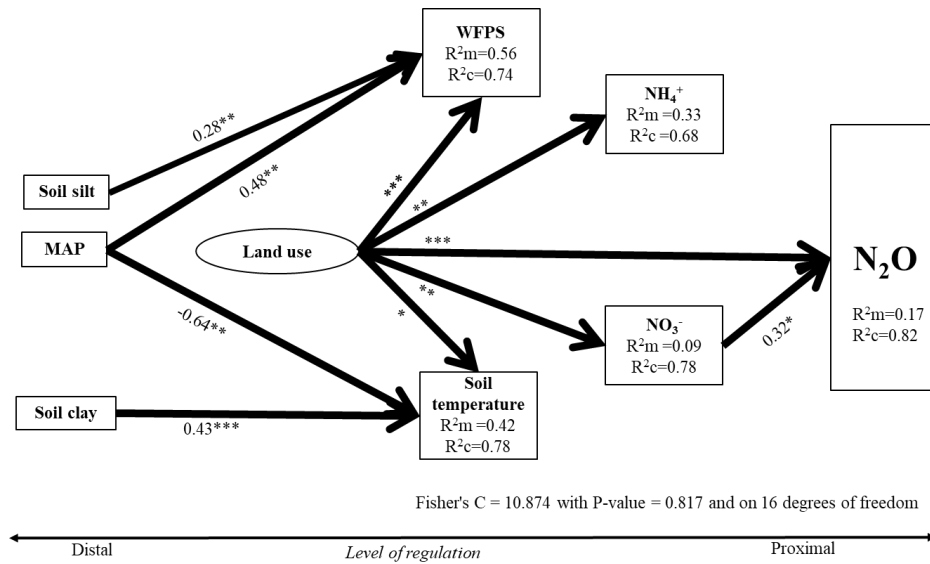


Figura 2. Modelos de ecuaciones estructurales (SEM). Las flechas negras representan efectos causales entre variables. Sólo se muestran los caminos significativos, y *, **, *** son P-valor < 0,05, P-valor < 0,01 y P-valor < 0,001 respectivamente. Los valores junto a cada flecha representan las pendientes estandarizadas. R^2_m es el coeficiente de regresión marginal que representa la varianza explicada por los efectos fijos y R^2_c es el coeficiente de regresión condicional.