

itea

información técnica económica agraria

REVISTA DE LA ASOCIACIÓN INTERPROFESIONAL PARA EL DESARROLLO AGRARIO



Volumen 120

Número 4

Diciembre 2024



aida-itea.org

2024- AÑO LV Vol. 120 N.º 4 http://dx.doi.org/10.12706/itea	DIRECCIÓN Y REDACCIÓN Avda. Montañana, 930 50059 ZARAGOZA (ESPAÑA) Tel.: 34-976 716305 Fax.: 34-976 716335 E-mail: direccion@aida-itea.org	Depósito legal: Z-577-82 ISSN: 2386-3765 Maquetación: Remedios Cordero
---	---	--

DIRECCIÓN:	Paula Gaspar, Universidad de Extremadura. España
EDICIÓN CIENTÍFICA:	José Manuel Alonso, CITA de Aragón. España Javier Álvarez, Universidad de Lleida. España Miguel Escribano, Universidad de Extremadura. España Gabriel Pardo, CITA de Aragón. España Ana Pina Sobrino, CITA de Aragón. España Helena Resano, IA2-Universidad de Zaragoza. España Guillermo Ripoll, CITA de Aragón. España Ana Isabel Sanjuán, CITA de Aragón. España
EDICIÓN TÉCNICA:	María Salillas, Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario. España
COMITÉ DE REDACCIÓN:	Alfonso Abecia, Universidad de Zaragoza. España Alicia Cirujeda, CITA de Aragón. España Azucena Gracia, CITA de Aragón. España Mª Engracia Guerra Velo, CICYTEX, Extremadura. España Sandra Lobón, CITA de Aragón. España María Teresa Maza, Universidad de Zaragoza. España José Manuel Mirás Avalos, MBG-CSIC de Galicia. España Daniel Villalba, Universidad de Lleida. España
COMITÉ ASESOR:	Ricardo Aké, Universidad Autónoma de Yucatán, México; Joaquín Aibar, Universidad de Zaragoza, España; Francisco Alcón, Universidad Politécnica de Cartagena, España; Ángeles Calatayud, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, España; Alba Cerisuelo, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, España; Kizkitza Insausti, Universidad Pública de Navarra, España; Ramón Isla, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón, España; Jorge Lora, Instituto de Hortofruticultura Subtropical y Mediterránea, España; Ana Meikle, Universidad de la República, Uruguay; Francisco Javier Mesías, Universidad de Extremadura, España; Ana Olaizola, Universidad de Zaragoza, España; Raquel Sánchez Pérez, Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CSIC), España; Manuel Serradilla, Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura, España; Verónica Sierra, Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario, España; Alfredo Teixeira, Escola Superior Agrária de Bragança, Portugal; Luis Varona, Universidad de Zaragoza, España.

ITEA-Información Técnica Económica Agraria aparece indexada en SCI Expanded, Journal Citation Reports/Science Editions, ICYT, CABI, SCOPUS y EBSCO. Prohibida toda reproducción total o parcial sin autorización expresa de la Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario, Editor titular del copyright. ITEA no se responsabiliza necesariamente de las opiniones vertidas en los artículos firmados que publica, cuya responsabilidad corresponde a sus autores.

<https://www.aida-itea.org/index.php/revista-itea/presentacion-itea>

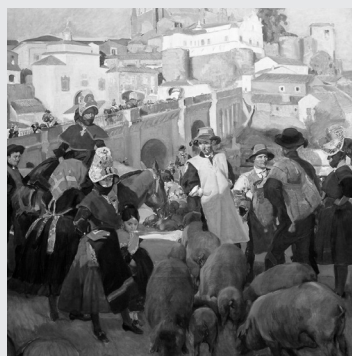


Foto: Cuadro de Joaquín Sorolla
Texto: Elena González

Extremadura, The Market, 1917. Joaquín Sorolla y Bastida (Museum: Hispanic Society of America, Sorolla Vision of Spain Gallery, Nueva York).

Archer Milton Huntington, fundador de la Sociedad Hispana de América, encargó a Sorolla una serie de 14 pinturas para una nueva galería que capturara la esencia de España. Una de estas obras, de 351 x 302 cm, representa el mercado "de los martes" en Plasencia (Cáceres), un mercado que con ocho siglos de historia se celebra desde la fundación de la ciudad. El cuadro muestra el bullicio del mercado con personas y carros cruzando el puente sobre el río Jerte, y el mercado de ganado a sus orillas, en este caso de cerdos ibéricos. Sorolla quedó impresionado por la vestimenta tradicional que los habitantes de Montermoso (una población cercana) llevaban al mercado y lo reflejó en su obra. Tanto Sorolla como Huntington señalaron que la serie mostraba una España "a punto de desaparecer".

<https://hispanicsociety.emuseum.com/objects/1646/vision-of-spain-formerly-the-provinces-of-spain-extrema>

Agradecimiento

Desde el Comité Editorial de la Revista ITEA-Información Técnica Económica Agraria, queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todos los evaluadores de artículos por su valiosa colaboración.

La publicación de un artículo en una revista indexada requiere una rigurosa evaluación “por pares”, incluso en ocasiones de la participación un tercer evaluador para garantizar la calidad y objetividad del proceso. Este año, en la evaluación de los artículos (ya sean publicados, rechazados o pendientes de publicación), hemos contado con la participación de 52 revisores. Somos plenamente conscientes de que la revisión de un artículo implica dedicar tiempo que los evaluadores podrían destinar a sus propios trabajos de investigación. Además, sabemos que esta tarea, fundamental para mantener los estándares de calidad de la Revista ITEA, a menudo se realiza en momentos libres. Por ello, queremos reconocer públicamente la importante contribución de quienes han colaborado con nosotros en este proceso.

En señal de agradecimiento, compartimos la relación de evaluadores que han participado este año. No obstante, respetamos la decisión de quienes han preferido permanecer en el anonimato, por lo que la lista no es completa.

José Luis Alabart Álvarez
María Jesús Alcalde
Carmen Barraso Gil
José Caverio Campo
Jacinta Collado González
María José Cubero Pablo
Pablo Delgado Sánchez
Juan de Dios Vagas Giraldo
Ana de Santiago Roldán
Francisco Espinosa Borreguero
Juan Florencio Tejeda Sereno
Lorenzo Fraile Sauce
David García Dios
Pilar García Rebollar
Idoia Goiri Zamora
Elena González Sánchez
Juan Ignacio Gutiérrez Cabanillas
Andrés Horrillo Gallardo
Margalida Joy Torrens
Teresa Juan Esteban
Porfirio Juárez López
Belén Lahoz Crespo

Josefa López Marín
Natalia López-Mosquera García
Clara María Marín Alcalá
Francisco Maroto Molina
Lluís Martín Closas
David Martínez Granados
María Teresa Maza Rubio
Francisco Javier Mesías Díaz
Zebensui Morales Reyes
Rodrigo Muiño Otero
Carlos Navarro Marcos
Carlos Palacios Riocerezo
Nuria Pedrol Zamora
Helena Resano Ezcaray
Antonio Rodríguez de Ledesma Vega
Edgar Omar Rueda Puente
Gabriela Sánchez Viveros
Albina Sanz Pascua
María Jesús Serrano Andrés
Pilar Uldemolins Gómez
Elora Valderas García
Carlos Zaragoza Larios

Sumario

Producción Vegetal

- Efecto sumidero de carbono del cultivo de tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) producido en Extremadura.
Carbon sink effect of tobacco (Nicotiana tabacum L.) growing in Extremadura.
 Juan Ignacio Gutiérrez-Cabanillas y Elena Ordiales 309
- Evaluación de la lixiviación potencial de nutrientes en un suelo calcáreo fertilizado con gallinaza.
Evaluation of the potential leaching of nutrients in a calcareous soil fertilized with laying hen manure.
 María Rosa Yagüe, Jesús Ángel Betrán, Pablo Bruna y María Carmen Lobo 325
- La biofortificación con nanopartículas de óxido de zinc vía foliar aumenta la acumulación de biomasa y calidad fitoquímica de la lechuga.
Biofortification with zinc oxide nanoparticles via foliar increases biomass accumulation and lettuce phytochemical quality.
 Manuel Fortis-Hernández, Alberto Sánchez-Estrada, Deniss Hernández-Cruz, Erika Lagunes-Fortiz, Rebeca Betancourd-Galindo y Judith Fortiz-Hernández 344

Producción Animal

- Pradera de *Lolium perenne* L. y *Trifolium repens* L. en Asturias. IV. Producción y composición de la leche en vacas Holstein en pastoreo (con y sin suplementación): análisis de 18 años.
Sown meadows of Lolium perenne and Trifolium repens in Asturias IV. Milk production and composition in grazing Holstein cows (with and without supplementation): 18-year analysis.
 Begoña de la Roza-Delgado, Adela Martínez-Fernández, M. Sagrario Modroño y Alejandro Argamentería 360
- Incorporación de orujo de uva al concentrado de corderos de cebo, efecto sobre las emisiones de metano. Estudio preliminar.
Effect of grape pomace on methane emissions in fattening lambs. Preliminary study.
 Carmen Barraso, Alfredo García, M. Montaña López-Parra y Pedro L. Rodríguez 380

Economía Agraria

- Gestión sostenible de los alimentos. Una aplicación de la Teoría del Comportamiento Planificado en el contexto de un país emergente: Colombia.
Sustainable food management: an application of the Theory of Planned Behavior in an emerging country: Colombia.
 Julieth Lizcano-Prada, Francisco J. Mesías, Olda Lami, Celia Sama-Berrocal y Marcela Maestre-Matos 397

Efecto sumidero de carbono del cultivo de tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) producido en Extremadura

Juan Ignacio Gutiérrez-Cabanillas* y Elena Ordiales

Centro Tecnológico Nacional Agroalimentario, CTAEX, Ctra. Villafranco a Balboa, km 1.2, 06195 Villafranco del Guadiana, Badajoz, España.

Resumen

El cultivo de tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) tiene una gran importancia socioeconómica en la región de Extremadura. Las plantas de *N. tabacum* fijan dióxido de carbono atmosférico a través de la fotosíntesis, siendo el objetivo de este estudio establecer el balance neto de carbono de esta actividad agrícola. Este estudio se ha realizado en el norte de Extremadura (Jaraíz de la Vera, Cuacos de Yuste y Talayuela), con las variedades PVH 2310, C241, C152 y TH 241. En este trabajo se ha determinado el carbono composicional de las diferentes partes de la planta (hojas, tallo y raíces), y junto con la biomasa producida a lo largo de su ciclo, se ha determinado la cantidad de CO₂ atmosférico fijado. Paralelamente se han calculado las emisiones de gases de efecto invernadero de la fase de campo (cultivo), que ha sido restada a la cantidad de CO₂ fijado por unidad funcional, obteniendo el balance neto de carbono. Con las prácticas habituales de manejo del cultivo de la campaña de 2023, la producción de 1 kg de tabaco fresco tiene un balance positivo medio de 0,6198 kg CO₂, y expresado por unidad de superficie, 1 ha de cultivo de tabaco permite obtener un balance positivo medio de 11.852,13 kg CO₂ ha⁻¹. Teniendo en cuenta las condiciones de este estudio, puede concluirse que la actividad que representa la producción de hojas de tabaco en Extremadura supone un sumidero de carbono positivo, fijando una cantidad de CO₂ atmosférico muy superior al que emite.

Palabras clave: Dióxido de carbono, GEIs, Huella de Carbono, *Nicotiana tabacum* L.

Carbon sink effect of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) growing in Extremadura

Abstract

Tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) growing has a great socio-economic importance in the region of Extremadura. *N. tabacum* plants capture atmospheric carbon dioxide through photosynthesis, and the objective of this study is to establish the net carbon balance of this agricultural activity. This study was carried out in the north of Extremadura (Jaraíz de la Vera, Cuacos de Yuste and Talayuela), with the varieties PVH 2310, C241, C152 and TH 241. In this work, the compositional carbon of the different parts of the plant (leaves, stem and roots) has been determined, and together with the biomass produced throughout its cycle, the amount of atmospheric CO₂ fixed has been determined. At the same time, greenhouse gas emissions from the field phase (crop) was calculated, which was subtracted from the amount of CO₂ fixed per functional unit, obtaining the net carbon balance. With the usual crop management

* Autor para correspondencia: jgutierrez@ctaex.com

Cita del artículo: Gutiérrez-Cabanillas J.I., Ordiales E. (2024). Efecto sumidero de carbono del cultivo de tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) producido en Extremadura. ITEA-Información Técnica Económica Agraria 120(4): 309-324. <https://doi.org/10.12706/itea.2024.007>



practices of the 2023 season, the production of 1 kg of fresh tobacco has an average positive balance of 0.6198 kg CO₂, and expressed per unit of surface area, 1 ha of tobacco crop provides an average positive balance of 11,852.13 kg CO₂ ha⁻¹. Taking into account the conditions of this study, it can be concluded that the activity represented by tobacco leaf production in Extremadura is a positive carbon sink, fixing a higher amount of atmospheric CO₂ than it emits.

Keywords: Carbon dioxide, GHG, Carbon Footprint, *Nicotiana tabacum* L.

Introducción

El tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) es una planta herbácea perenne, que solamente se encuentra como cultivo y puede alcanzar una altura de entre 1 a 2 m. *N. tabacum* es una planta originaria de América tropical y subtropical, pero en la actualidad se cultiva comercialmente en todo el mundo (Rawat y Mali, 2013). El tabaco es considerado como un importante cultivo industrial y sus hojas son la principal materia prima en la producción de tabaco (Zhang *et al.*, 2018).

El cultivo de tabaco en España se concentra en Extremadura (Norte de Cáceres), donde se establece más del 98 % de la superficie total de tabaco crudo o en rama. La producción española representa aproximadamente el 19 % de la producción de la Unión Europea, siendo el 2º productor de la UE (solo superado por Italia), y el 0,5 % de la producción mundial. España cuenta con 1.359 productores de hoja de tabaco. Un 94 % se ubican en Extremadura y el 6 % restante se reparten entre Castilla y León, Castilla-La Mancha, Navarra y Andalucía. El tamaño medio de las explotaciones es de 6,4 ha (MAPA, 2022).

La cadena de valor del tabaco, desde el cultivo al punto de venta, genera un impacto económico de unos 3.200 millones de euros de Valor Añadido Bruto (VAB) en la economía española, lo que representa el 0,3 % del Producto Interior Bruto (PIB) español (Rivero *et al.*, 2022). Además, el tabaco es el quinto mayor contribuyente del Estado con una recaudación fiscal que suma unos 9.000 millones de euros al año, el equivalente al 5 % del total

de los ingresos del Estado y al 34 % de los impuestos especiales (Mesa del Tabaco, 2020).

Cabe destacar que el sector tabaquero genera cada año 1.188 empleos directos. Por tanto, el valor económico generado de las producciones tabaqueras es determinante para la continuidad de las oportunidades de trabajo en las zonas de referencia, siendo clave para afrontar de forma eficaz el reto demográfico existente en la región, así como para la preservación de la actividad económica, tanto en fase productiva de campo, como en otras fases posteriores de la cadena de valor y el conjunto de actividades que actúan como proveedores (maquinaria agrícola, suministradores de abonos, empresas de servicios agrarios –laboratorios, certificadoras–, empresas de instalaciones, etc.) (Rivero *et al.*, 2022). De estas cifras se extrae la importancia socioeconómica que tiene el sector del tabaco en Extremadura, situándolo como sector estratégico para el sustento de las comarcas donde se produce (Miranda, 2018).

Por otra parte, la huella de carbono (HC) es un indicador importante para evaluar los impactos en el calentamiento global/cambio climático de un sistema de producción (Wiedmann y Minx, 2008; Yang *et al.*, 2015). La HC puede definirse como “la cantidad de gases de efecto invernadero (GEIs) expresada en términos de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), emitida a la atmósfera por un individuo, organización, proceso, producto o evento dentro de un límite especificado” (Pandey *et al.*, 2011). El conjunto de GEIs y los límites se definen en función de la metodología adoptada. Se han diseñado diferentes

metodologías para su cálculo, pero las más utilizadas en organizaciones públicas y privadas son el *Green House Gas Protocol (GHG Protocol)* y la norma ISO 14.064-1 (Cano et al., 2023). A modo de ejemplo, el Programa de Naciones Unidas evalúa la consecución de algunas de las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible bajo la metodología establecida en la norma ISO 14.064-1 (IPCC, 2021; Sachs et al., 2021).

En contrapartida a las emisiones de GEIs, se conoce como sumidero a todo sistema o proceso que extrae de la atmósfera un gas o gases y se almacena. Los ecosistemas vegetales constituyen un proceso natural para sustraer dióxido de carbono atmosférico, ya que por medio de la fotosíntesis el carbono queda fijado en la estructura vegetal (biomasa) donde se mantiene almacenado por largos periodos de tiempo (Zermeño-González et al., 2011; Keenan y Williams, 2018). El CO₂ secuestrado por las plantas es el resultado de las diferencias entre el CO₂ atmosférico absorbido durante el proceso de la fotosíntesis y este mismo gas emitido a la atmosfera durante la respiración (Carvajal et al., 2014; Keenan y Williams, 2018).

En los últimos años, se ha prestado cada vez más atención a los sistemas de producción agrícola debido a su potencial de calentamiento global (Garnett, 2012; Yan et al., 2015). No obstante, todos los ecosistemas agronómicos

secuestran, producen y consumen simultáneamente fuentes de carbono, y un cultivo determinado en un sistema de plantación específico puede actuar como fuente o sumidero neto de carbono en diferentes momentos (Yan et al., 2023).

Teniendo en cuenta la importancia que tiene el cultivo de tabaco en Extremadura, y la cantidad de biomasa que produce, el objetivo de este trabajo es estudiar el efecto sumidero de carbono que pueden tener las plantas de *N. tabacum* en el cómputo de emisiones de CO₂ que se producen en la fase de cultivo del tabaco, y comprobar si este efecto sumidero puede ser suficiente para compensar las emisiones de CO₂ provocadas por esta actividad.

Material y métodos

Material vegetal, localización y condiciones del ensayo

Para llevar a cabo el presente trabajo se realizó un muestreo de campo en 4 parcelas cultivadas de tabaco de las comarcas de La Vera y Campo Arañuelo, en el norte de Extremadura (España). En cada localización se cultivó una variedad diferente y cada agricultor llevó a cabo su manejo habitual de Producción Integrada (Tabla 1). El muestreo de plantas se realizó en la campaña de 2023.

Tabla 1. Características de cada parcela de tabaco muestreada.
Table 1. Characteristics of each tobacco plot sampled.

Variedad/Código	Término municipal	Superficie (ha)	Densidad (plantas ha ⁻¹)	Rendimiento ⁽¹⁾ (kg ha ⁻¹)
PVH 2310	Jaraíz de la Vera	4,28	19481	20775
C 241	Cuacos de Yuste	5,64	18939	13844
C 152	Talayuela	2,71	19380	24107
TH 241	Talayuela	8,23	20000	21911

⁽¹⁾ Rendimiento: rendimiento total de hoja de tabaco en fresco.

Diseño Experimental

Para el estudio se consideró únicamente la producción anual de biomasa de todas las plantas de tabaco analizadas, tanto de la parte aérea (tallos y hojas) como de la raíz (IPCC, 2003). Las hojas se recolectaron ("repele") según la práctica habitual ("por pisos"), con un total de 3 recolecciones (piso inferior, piso central y piso superior). Antes del primer repele, se marcaron aleatoriamente diez plantas en cada localización. Al final de su ciclo de cultivo (tercer repele, del piso superior), también se retiró la totalidad de tallos y raíces. Todos los muestreos fueron realizados 2-3 días antes de la cosecha comercial.

De cada parcela se extrajeron las plantas del suelo con una pala manual, con cuidado de no romper las raíces secundarias, y se colocaron individualmente en bolsas transpirables para su procesamiento. A continuación, se separaron en hoja, tallo y raíz y estas partes se pesaron para determinar su peso en fresco (Figura 1A).

Cada fracción vegetal se secó a 60 °C durante 48-72 h hasta peso constante, para determinar el peso seco y, a continuación, la muestra seca se trituró en una batidora de laboratorio y se pasó por un tamiz de 1 mm (Figura 1B).

La figura 2 muestra las fases que se han llevado a cabo para cumplir el objetivo de este estudio.

Parámetros evaluados

Contenido de carbono de cada fracción de la planta

El porcentaje de carbono (PC) se analizó a partir de submuestras (15-50 mg de peso seco) de hojas, tallos, frutos y raíces con un

microanalizador elemental LECO CHN-628, siguiendo el procedimiento de trabajo interno estándar PNT01. El procedimiento es aplicable a muestras homogéneas, sólidas, no volátiles y líquidas viscosas, que se queman a 950 °C.

Posteriormente, se calculó el contenido de carbono (CC) de la planta mediante la siguiente ecuación, en la que el porcentaje de carbono se relaciona con la biomasa seca (BS) de cada fracción vegetal:

$$CC = (PC_{raíces} \times BS_{raíces}) + (PC_{tallos} \times BS_{tallos}) + (PC_{hojas} \times BS_{hojas}) \quad [1]$$

donde CC es el contenido de carbono de la planta entera (g); PC es el porcentaje de carbono analizado en cada fracción vegetal (g 100g⁻¹); y BS es la cantidad de biomasa seca de cada fracción vegetal (g).

Cantidad de CO₂ atmosférico fijado por las plantas

El secuestro anual de carbono se calcula según el siguiente algoritmo:

$$CO_2 \text{ fijado} = CC \times \frac{44}{12} \quad [2]$$

donde CO₂ fijado es el secuestro de carbono (kg CO₂ planta⁻¹); CC es el contenido de carbono de las plantas (kg C planta⁻¹); y el multiplicador 44/12 convierte el carbono en CO₂ (Lazzerini et al., 2022).

En este estudio se calculó el CO₂ fijado por cada fracción vegetal de la planta, y también teniendo en cuenta la unidad funcional de 1 kg de hoja de tabaco fresco producido, aplicando la siguiente ecuación:

$$CO_2 \text{ fijado por ud. funcional} = \frac{\text{Densidad de plantación} \times CO_2 \text{ fijado por planta}}{\text{Rendimiento}} \quad [3]$$

A



B



Figura 1. Preparación de las muestras. (A) Muestreo de campo (izquierda) y separación de las fracciones vegetales (derecha), (B) Secado de fracciones vegetales (izquierda) y trituración de las fracciones (derecha).

Figure 1. Sample preparation. (A) Field sampling (left) and separation of plant fractions (right), (B) Drying of plant fractions (left) and grinding of fractions (right).

donde la densidad de plantación es el número de plantas cultivadas en 1 ha, el CO_2 fijado por planta se obtiene en la ecuación (2) y el rendimiento es la cantidad total de hoja de tabaco fresco cosechada en 1 ha.

Huella de carbono del cultivo

En este trabajo se ha utilizado la metodología UNE-ISO 14064-1 para el cálculo de la HC de los campos seleccionados, utilizando una calculadora específica para cultivos agrícolas desarrollada por el Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO, 2023). El alcance de esta herramienta es 1+2 (emisiones directas + emisiones indirectas debidas al consumo eléctrico). Para ello, fue necesario recopilar todos los datos que se muestran en la Tabla 2.

La unidad funcional de cálculo fue 1 kg de hoja de tabaco fresco producido, obteniéndose las emisiones de CO_2 equivalente ($\text{kg CO}_2\text{eq kg}^{-1}$), que pueden compararse con el carbono fijado por las plantas, cuando se extrapolan a términos de producción (Zhang *et al.*, 2022).

Balance de carbono del cultivo de tabaco

El efecto sumidero de carbono del cultivo de tabaco como compensación de las emisiones producidas por esta propia actividad (Balance de Carbono, BC, kg CO_2 kg de tabaco fresco $^{-1}$) se obtuvo teniendo en cuenta la unidad funcional (1 kg de tabaco fresco producido), restando el resultado obtenido en el secuestro de carbono (CO_2 fijado) del resultado de la HC del cultivo:

$$BC_{\text{cultivo}} = \text{CO}_2_{\text{fijado}} - HC_{\text{cultivo}} \quad [4]$$

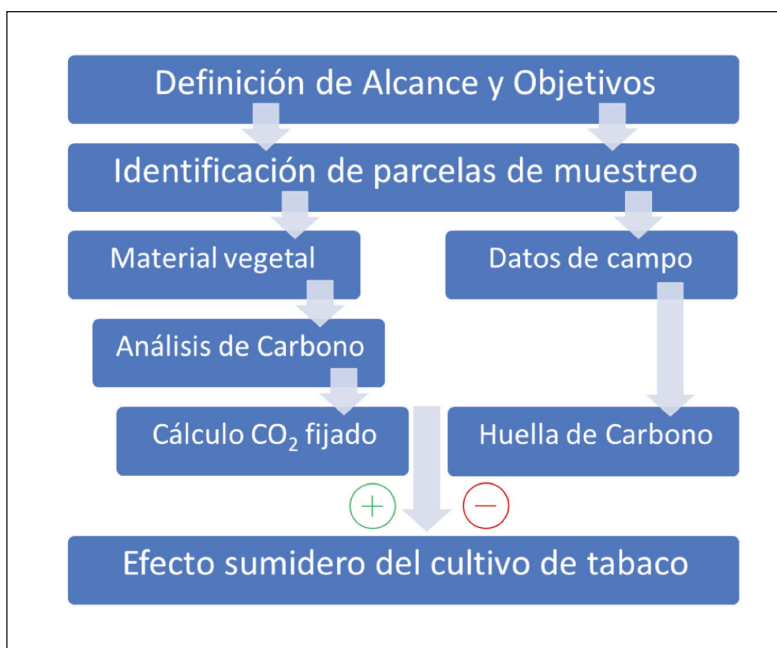


Figura 2. Representación esquemática de las etapas de la investigación.
Figure 2. Schematic representation of the research stages.

Tabla 2. Datos necesarios para el cálculo de la huella de carbono agrícola (UNE-ISO 14064-1).
Table 2. Data required for the calculation of the agricultural carbon footprint (UNE-ISO 14064-1).

Alcance	Tipo de dato	Datos necesarios
1	Datos generales	Provincia, Superficie de parcela (ha) y Producción (kg).
1	Datos del cultivo	Tipo de cultivo, Fertilizantes sintéticos nitrogenados, Estiércoles y purines, Otros abonos (lodos, compost), Enmiendas calizas y Destino de los residuos de cultivo (quema de residuos, incorporación al suelo o retirada de plantas).
1	Emisiones del cultivo	Emisiones indirectas de N ₂ O (lixiviación, escorrentía y deposición atmosférica) ⁽¹⁾ .
1	Combustibles fósiles en parcela	Tipo de instalación, tipo de combustible y cantidad de combustible.
1	Vehículos y maquinaria	Desplazamientos por carretera (Tipo de vehículo, Tipo de combustible y Cantidad de combustible), y Maquinaria agrícola (Labores del suelo, Labores durante el ciclo de cultivo y Labores de recolección).
1	Emisiones fugitivas	Tipo de gas refrigerante, capacidad del equipo y recarga del equipo.
2	Electricidad	Electricidad en parcela (Nombre de la entidad suministradora y Datos de consumo), y Electricidad en vehículos (Nombre de la entidad suministradora y Datos de consumo).

⁽¹⁾ Con la herramienta diseñada por MITECO, las emisiones indirectas de N₂O se calculan automáticamente a partir de los datos anteriores.

Análisis estadístico

Los datos han sido analizados mediante el paquete estadístico SPSS 24.0 (SPSS, IBM Statistics, Armonk, NY, USA). Se realizó un análisis descriptivo con el fin de calcular las medias y el error típico de la media de las mediciones obtenidas para cada parámetro evaluado en el epígrafe 2.3 (variables independientes). Se utilizó el procedimiento MLG (Modelo Lineal General) para llevar a cabo un análisis de la varianza de una vía con las diferentes localizaciones, la densidad de plantación y la variedad cultivada como efectos principales. El nivel de significación estadística se definió como $P < 0,05$. En los casos en que el efecto de algunas de las variables independientes fue significativo, las medias se compararon mediante el test de Tukey ($P < 0,05$).

Resultados y discusión

Porcentaje de carbono de cada fracción de la planta

En la Tabla 3 se muestra el PC que contiene cada fracción de las plantas de tabaco, en cada localización muestreada. El PC de las raíces estuvo comprendido entre 20,17 y 32,33 % C, el del tallo entre 39,51 y 40,65 % C, y el de las hojas entre 38,83 y 39,99 % C. Las diferencias encontradas en el PC de las raíces de las plantas entre parcelas fueron estadísticamente significativas ($P < 0,05$). En cambio, no se encontraron diferencias en el porcentaje de carbono del tallo ni de las hojas ($P > 0,05$). Las plantas con mayor proporción de carbono en la composición de las raíces fueron las de la parcela cultivada con la variedad C 152,

Tabla 3. Porcentaje de carbono (PC) de cada fracción de la planta (raíz, tallo y hojas) de cada variedad muestreada (media $\pm$ error típico).

Table 3. Carbon percentage (PC) of each plant fraction (root, stem and leaves) (mean $\pm$ typical error).

Variedad	PC raíces (%)	PC tallo (%)	PC hojas (%)
PVH 2310	21,88 ^b $\pm$ 3,25	39,51 $\pm$ 0,31	39,93 $\pm$ 0,25
C 241	20,17 ^b $\pm$ 3,16	40,65 $\pm$ 0,39	39,99 $\pm$ 0,33
C 152	32,33 ^a $\pm$ 2,94	39,57 $\pm$ 0,18	38,84 $\pm$ 0,26
TH 241	20,55 ^b $\pm$ 3,41	39,70 $\pm$ 0,35	38,83 $\pm$ 0,45
Significación (P)	*	ns	ns
Promedio	23,73 $\pm$ 3,19	39,86 $\pm$ 0,31	39,40 $\pm$ 0,32

^{a, b} = diferentes letras implican diferencias significativas entre parcelas, $P < 0,05$. Test de Tukey.

mientras que los PC del tallo y de las hojas fueron bastante homogéneos entre las diferentes localizaciones. De media, el tallo y las hojas presentaron mayor PC (39,40-39,86 % C) que las raíces (23,73 % C). Carvajal *et al.* (2014) también encontraron mayores PC en la parte aérea de las plantas de tomate y cereales que en las raíces, aunque en otros cultivos, los PC de las distintas fracciones fueron

similares (pimiento, sandía, crucíferas y árboles frutales, entre otros).

El dato de PC aportado en la Tabla 3 corresponde al valor medio de las tres cosechas realizadas ("repeles"). En la Tabla 4 se muestran los valores de PC de las hojas para cada momento de recolección (R1, R2 y R3). Dentro de cada cosecha, no hubo diferencias significativas en el PC de las hojas entre las distintas

Tabla 4. Porcentaje de carbono (PC) de las hojas de tabaco en cada cosecha (R1, R2 y R3) y de cada variedad muestreada (media $\pm$ error típico).

Table 4. Carbon percentage (PC) of tobacco leaves at each harvest (R1, R2 and R3) (mean $\pm$ typical error).

Variedad	PC hojas R1 (%)	PC hojas R2 (%)	PC hojas R3 (%)	Significación cosecha (P_R)
PVH 2310	37,34 ^z $\pm$ 0,69	40,33 ^y $\pm$ 0,44	42,12 ^x $\pm$ 0,28	***
C 241	37,69 ^y $\pm$ 0,68	40,49 ^x $\pm$ 0,29	41,79 ^x $\pm$ 0,43	***
C 152	36,35 ^y $\pm$ 0,50	39,54 ^x $\pm$ 0,23	40,62 ^x $\pm$ 0,59	***
TH 241	36,44 ^y $\pm$ 0,99	39,61 ^x $\pm$ 0,42	40,44 ^x $\pm$ 0,66	**
Significación parcela (P_p)	ns	ns	ns	
Promedio	36,96 $\pm$ 0,72	39,99 $\pm$ 0,34	41,24 $\pm$ 0,49	

^{a, b} = diferentes letras implican diferencias significativas entre parcelas, $P < 0,05$. Test de Tukey.

^{x, y, z} = diferentes letras implican diferencias significativas entre distintas cosechas dentro de cada parcela, $P < 0,05$. Test de Tukey.

localizaciones ($P_p > 0,05$), con valores medios de 36,96 % C en R1; 39,99 % C en R2 y 41,24 % C en R3. Como puede observarse, de forma generalizada existe un aumento del PC de las hojas en cada cosecha, siendo estas diferencias estadísticamente significativas en todas las localizaciones ($P_R < 0,001$ en variedades PVH 2310, C 241 y C 152; y $P_R < 0,01$ en variedad TH 241). Este resultado es debido a que, a lo largo del ciclo de cultivo, la tasa de acumulación de materia seca por unidad de área foliar (tasa de asimilación neta) va aumentando (Gardner et al., 1985).

Cantidad de CO₂ atmosférico fijado por las plantas de tabaco

En la Tabla 5 pueden observarse las cantidades de CO₂ fijado por cada fracción de la planta y dentro de cada localización, teniendo en cuenta el PC y el peso seco total (BS).

La cantidad de CO₂ fijado en las raíces de las plantas estuvo comprendido entre 82,01 y 172,14 g CO₂ planta⁻¹ (de media, 128,69 g CO₂ planta⁻¹), en el tallo entre 151,57 y 224,25 g CO₂ planta⁻¹ (de media, 199,96 g CO₂ planta⁻¹), en las hojas entre 361,78 y 413,53 g CO₂ planta⁻¹

(de media, 393,97 g CO₂ planta⁻¹), y en la totalidad de la planta entre 595,36 y 796,74 g CO₂ planta⁻¹ (de media, 722,32 g CO₂ planta⁻¹). Como puede observarse, la fracción de biomasa con mayor contenido de CO₂ fijado fueron las hojas de tabaco.

La cantidad de CO₂ fijado en las raíces fue superior en la parcela cultivada con la variedad C 241, mientras que las raíces de las plantas de la variedad PVH 2310 fueron las que menor cantidad de CO₂ pudieron fijar ($P < 0,05$). Teniendo en cuenta los valores de PC de las raíces (Tabla 3), cabría esperar una mayor fijación de CO₂ en las raíces de las plantas de la variedad C 152. En cambio, los resultados obtenidos indican que el peso de las raíces fue significativamente superior en la variedad C 241, contrarrestando el menor PC en su composición.

Con respecto a la cantidad de CO₂ fijado en el tallo, también hubo diferencias significativas entre localizaciones ($P < 0,05$), obteniendo un mayor grado de fijación de CO₂ en los tallos de las plantas de las variedades C 241 y C 152. A nivel composicional, el PC de los tallos fue muy homogéneo entre parcelas (Tabla 3), por lo que al igual que sucediera

Tabla 5. Cantidad de CO₂ atmosférico fijado por cada fracción de la planta de tabaco (g CO₂ planta⁻¹) de cada variedad muestreada (media ± error típico).
Table 5. Amount of atmospheric CO₂ fixed per tobacco plant fraction (g CO₂ plant⁻¹) (mean ± typical error).

Variedad	CO ₂ Raíces (g CO ₂ planta ⁻¹)	CO ₂ Tallo (g CO ₂ planta ⁻¹)	CO ₂ Hojas (g CO ₂ planta ⁻¹)	CO ₂ Total (g CO ₂ planta ⁻¹)
PVH 2310	82,01 b ± 13,43	151,57 b ± 4,52	361,78 ± 17,42	595,36 b ± 18,62
C 241	172,14 a ± 38,85	224,25 a ± 25,70	400,35 ± 26,76	796,74 a ± 61,92
C 152	115,66 ab ± 11,17	220,57 a ± 14,10	413,53 ± 16,85	749,76 a ± 35,08
TH 241	144,95 ab ± 19,00	202,24 ab ± 13,81	400,21 ± 17,39	747,40 a ± 30,66
Significación (P)	*	*	ns	**
Promedio	128,69 ± 20,61	199,66 ± 14,53	393,97 ± 19,60	722,32 ± 36,57

a, b = diferentes letras implican diferencias significativas entre parcelas, $P < 0,05$. Test de Tukey.

con las raíces, se puede concluir que los tallos de las plantas de las variedades C 241 y C 152 tuvieron un mayor desarrollo.

En cuanto a la cantidad de CO_2 fijado en las hojas de tabaco, no existieron diferencias estadísticamente significativas entre parcelas ($P > 0,05$), siendo ésta la fracción de la planta donde se fijó la mayor cantidad de CO_2 atmosférico (de media, el 54,54 % del total de la planta). Parvin *et al.* (2020) encontraron resultados similares en leguminosas, donde las hojas fijaron más de la mitad de CO_2 del total de la planta, sin haber diferencias con distintas condiciones de crecimiento.

Teniendo en cuenta la totalidad de la planta, las diferencias en la cantidad de CO_2 fijado por parte de las raíces y de los tallos se tradujeron en una mayor captación de CO_2 fijado en las plantas de las variedades C 241, C 152 y TH 241 ($P < 0,01$), con valores muy si-

milares en estas tres localizaciones, y con un valor promedio de $722,32 \text{ g CO}_2 \text{ planta}^{-1}$.

Referido a la unidad funcional (1 kg de tabaco en fresco), en este ensayo, la producción de 1 kg de hoja de tabaco fresco lleva asociada la fijación de entre 0,5583 y 1,0900 kg CO_2 , con un valor promedio de fijación de $0,7333 \text{ kg CO}_2 \text{ absorbido kg tabaco fresco}^{-1}$ (Figura 3). En este caso, la mayor cantidad de CO_2 absorbido por unidad funcional fue en la parcela cultivada con la variedad C 241 ($P < 0,001$). Esto es debido a que en esta parcela los rendimientos fueron significativamente inferiores al resto, unido al hecho de que se mantuvo a la cabeza en los parámetros de CO_2 fijado en la totalidad de la planta (Tabla 5). También puede concluirse que el déficit de producción de esta variedad fue compensado por una mayor cantidad de CO_2 fijado por parte de las raíces y de los tallos en esta localización.

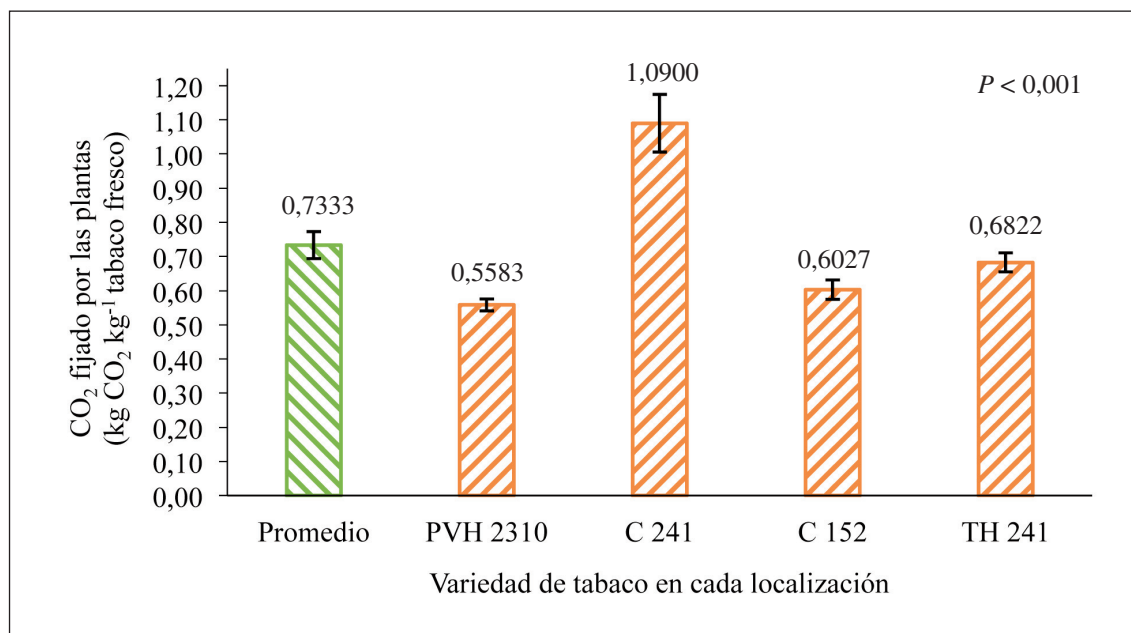


Figura 3. Dióxido de carbono (CO_2) fijado en las plantas por unidad funcional (1 kg de hoja de tabaco en fresco) en cada localización.

Figure 3. Carbon dioxide (CO_2) fixed in plants per functional unit (1 kg of fresh tobacco leaf) at each location.

Huella de carbono del cultivo

En la Figura 4A se muestran los cálculos de HC de cada una de las localizaciones ensayadas, es decir, la totalidad de GEIs emitidos por el cultivo durante el ciclo, y expresados en kg de CO₂ equivalente.

En las condiciones de este estudio, por cada kilogramo de hoja de tabaco en fresco (TF) producido se emitieron en campo entre 0,0644 y 0,1754 kg CO₂eq kg TF⁻¹ (0,1135 kg CO₂eq kg TF⁻¹ de media).

En la Figura 4B puede observarse que, dentro de todas las fuentes de emisión de GEIs del cultivo, la aplicación de fertilizantes sintéticos nitrogenados y la gestión de los residuos de cultivo fue la principal fuente de emisión de CO₂eq. Estos resultados concuerdan con los establecidos por Boettcher *et al.* (2020) al tener en cuenta todo el ciclo de vida del tabaco. En otros estudios, la principal fuente de emisión de la fase de campo fue la quema de los restos de cultivo (Gutiérrez-Cabanillas *et al.*, 2022), ya que esta actividad aumenta significativamente la huella de carbono de la actividad agrícola (Jaiswal y Agrawal, 2020). En el cultivo de tabaco, esta práctica no es habitual, además de estar muy restringida en la Unión Europea dentro de las medidas de la Política Agraria Común (Nikolić-Popadić, 2022).

Boettcher *et al.* (2020) comprobaron que la etapa de producción de tabaco en campo es la de mayor aporte de emisiones de GEIs de esta actividad, alcanzando valores del 85,92-87,30 %, muy superior a las etapas de producción de semillas, el curado y el procesado industrial.

Balance de carbono del cultivo de tabaco

En la Figura 5 se muestran los resultados del efecto del cultivo de tabaco como sumidero de CO₂ en cada localización (balance de carbono, BC), es decir, la diferencia entre la can-

tidad de CO₂ fijado de la atmósfera por parte de las plantas y la cantidad de CO₂ equivalente emitido por esta actividad agrícola.

El BC del cultivo estuvo comprendido entre 0,4938 y 0,9146 kg CO₂ kg TF⁻¹, con un valor medio de 0,6198 kg CO₂ kg TF⁻¹. Es decir, la producción de 1 kg de tabaco fresco tiene un balance positivo medio de 0,6198 kg CO₂. Las diferencias encontradas en este rango fueron estadísticamente significativas ($P < 0,001$) entre localizaciones, observando un mayor efecto sumidero en la parcela cultivada con la variedad C 241. En todas las localizaciones se compensaron ampliamente las emisiones de CO₂ producidas por el cultivo de tabaco. Zhang *et al.* (2022) también llegaron a conclusiones similares, realizando un estudio exhaustivo sobre el sector del tabaco en China.

Finalmente, considerando 1 ha de cultivo como unidad funcional para el cálculo del efecto sumidero de esta actividad, los valores estuvieron comprendidos entre 10.259,47 y 13.219,05 kg CO₂ ha⁻¹, con un valor medio de 11.852,13 kg CO₂ ha⁻¹ (Figura 6). Por tanto, 1 ha de cultivo de tabaco, en las condiciones de este ensayo, permite obtener un BC medio positivo de 11.852,13 kg CO₂ ha⁻¹. Aunque las diferencias entre localizaciones no fueron tan acusadas como en la unidad funcional de TF, de nuevo hubo diferencias estadísticamente significativas entre localizaciones ($P < 0,05$), siendo en este caso la parcela cultivada con la variedad TH 241 donde se evidenció un mayor efecto sumidero de CO₂ por cada hectárea cultivada de tabaco. Así, en todas las localizaciones se compensaron ampliamente las emisiones de CO₂ producidas en campo, referidas a la unidad funcional de 1 ha de cultivo de tabaco. Extrapolando estos resultados a una sola planta, teniendo en cuenta los datos de densidad de plantación aportados en la Tabla 1, cada planta de tabaco tendría un balance positivo de entre 0,5266 y 0,6686 kg CO₂ planta⁻¹, con un valor medio de 0,6094 kg CO₂ planta⁻¹.

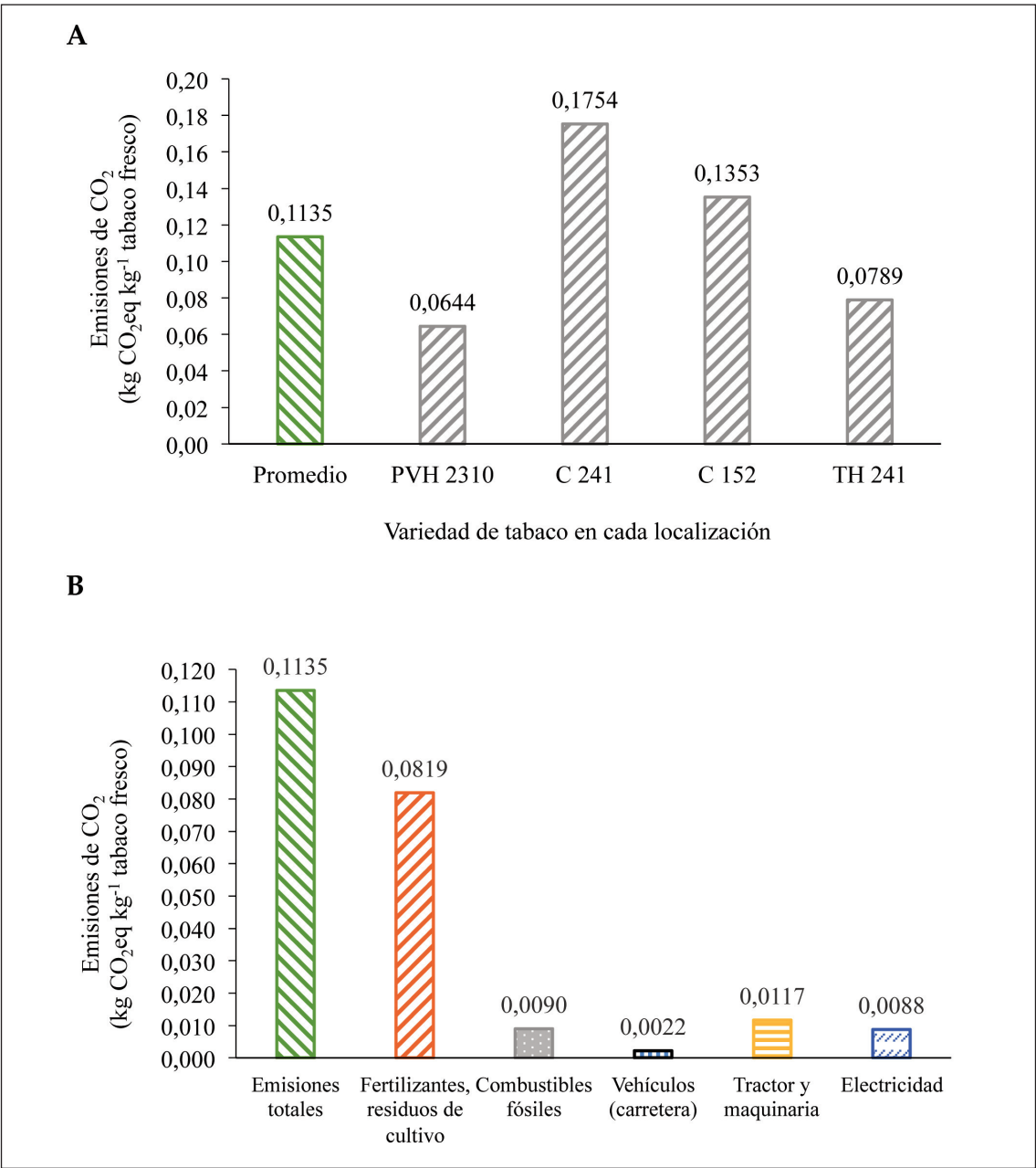


Figura 4. Huella de carbono de las parcelas muestreadas (kg CO₂eq kg⁻¹ tabaco fresco). (A) Huella de carbono total en cada localización para la producción de 1 kg de tabaco, (B) Huella de carbono media de cada actividad agrícola en la producción de tabaco.

Figure 4. Carbon footprint of the sampled plots (kg CO₂eq kg⁻¹ fresh tobacco). (A) Total carbon footprint at each location for the production of 1 kg of tobacco, (B) Average carbon footprint of each agricultural activity in tobacco production.

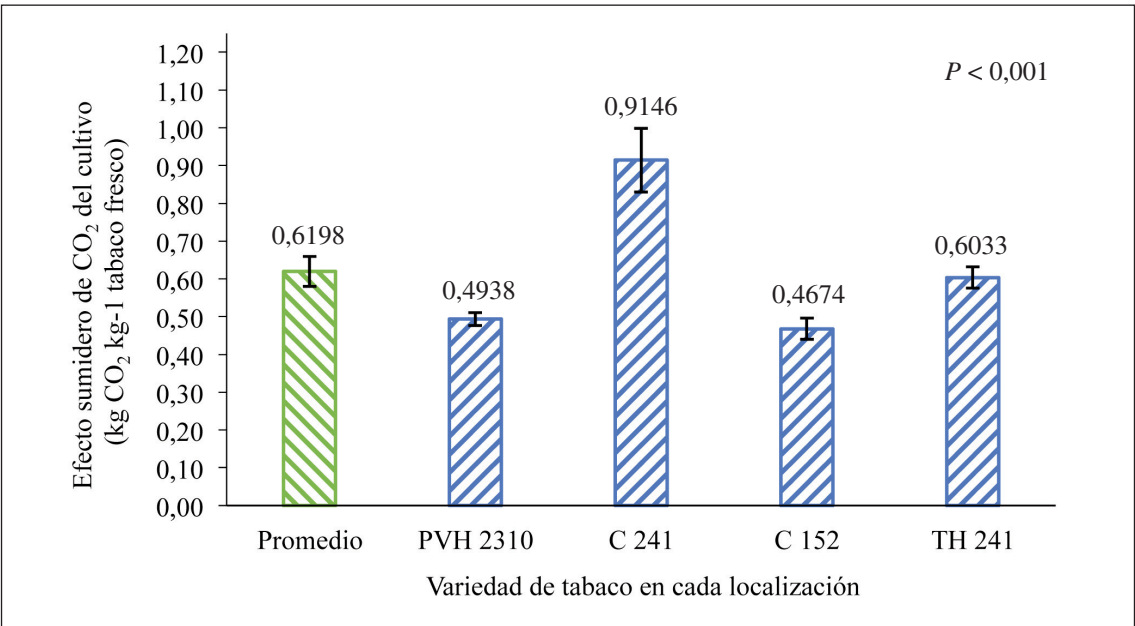


Figura 5. Balance de carbono (efecto sumidero de CO₂) del cultivo de tabaco por unidad funcional (1 kg de hoja de tabaco en fresco) en cada localización.
Figure 5. Carbon balance (CO₂ sink effect) of tobacco growing per functional unit (1 kg of fresh tobacco leaf) at each location.

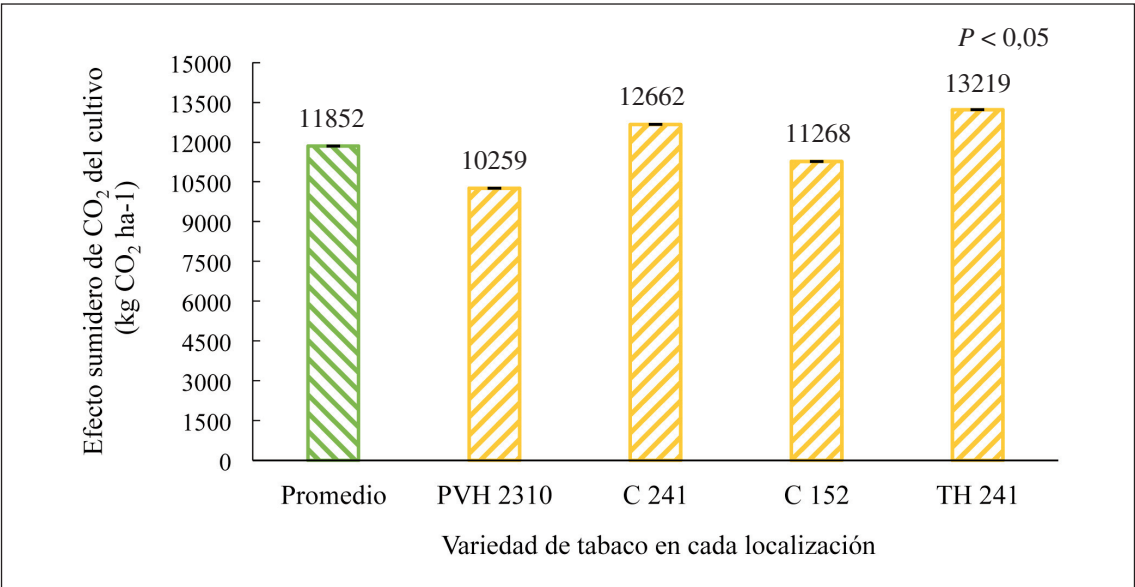


Figura 6. Balance de carbono (efecto sumidero de CO₂) del cultivo de tabaco por hectárea de cultivo en cada localización.
Figure 6. Carbon balance (CO₂ sink effect) of tobacco growing per hectare of crop at each location.

Conclusiones

Las hojas son la fracción de la planta de tabaco que mayor contenido de CO₂ fija de la atmósfera, seguido del tallo y de las raíces, aumentando el porcentaje de carbono a medida que avanza el ciclo. El total de CO₂ fijado por las plantas de tabaco, de media, fue de 722,32 g CO₂ planta⁻¹. La producción de 1 kg de tabaco en fresco lleva asociada un valor promedio de fijación de 0,7333 kg CO₂. La huella de carbono media de las localizaciones analizadas fue de 2.189,40 kg CO₂eq ha⁻¹. En las condiciones de este estudio, por cada kilogramo de hoja de tabaco en fresco producido se emitieron en campo 0,1135 kg CO₂eq. En la evaluación del balance de carbono del cultivo, puede concluirse que la producción de 1 kg de tabaco fresco tiene un balance positivo medio de 0,6198 kg CO₂, y expresado por unidad de superficie, 1 ha de cultivo de tabaco permite obtener un balance positivo medio de 11.852,13 kg CO₂ ha⁻¹. Teniendo en cuenta las condiciones de este estudio, puede concluirse que la actividad que representa la producción de hojas de tabaco en Extremadura supone un sumidero de carbono positivo, fijando una cantidad de CO₂ atmosférico muy superior al que emite.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Compañía Española de Tabaco en Rama S.A. (CETARSA) la financiación del proyecto que ha permitido la realización de los trabajos experimentales recogidos en la presente publicación. Además, agradecen a Octavio Torollo y Antonio Bollo (CETARSA) su inestimable ayuda, así como a todos los agricultores que cedieron sus parcelas de cultivo para la realización del estudio.

Referencias bibliográficas

- Boettcher R., Zappe A.L., de Oliveira P.F., Machado Ê.L., de Assis Lawisch-Rodriguez A., Rodriguez-Lopez D.A. (2020). Carbon Footprint of agricultural production and processing of tobacco (*Nicotiana tabacum*) in southern Brazil. *Environmental Technology & Innovation* 18: 100625. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100625>
- Cano N., Berrio L., Carvajal E., Arango S. (2023). Assessing the carbon footprint of a Colombian University Campus using the UNE-ISO 14064-1 and WRI/WBCSD GHG Protocol Corporate Standard. *Environmental Science and Pollution Research* 30: 3980-3996. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22119-4>
- Carvajal M., Mota C., Alcaraz-López C., Iglesias M. (2014). Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos de la Región de Murcia. Disponible en: http://www.lescco2.es/pdfs/noticias/ponencia_cisc_espanol.pdf (Consultado: 19 febrero 2024).
- Gardner F.P., Brent Pearce R., Mitchel R.L. (1985) Carbon fixation by crop canopies. En: *Physiology of Crop Plants*, (Ed. Gardner F.P., Brent Pearce R., Mitchel R.L.), pp. 31-57. Iowa State University Press.
- Garnett T. (2012). Three perspectives on sustainable food security: efficiency, demand restraint, food system transformation. What role for LCA? 8th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector, 1-4 octubre, Saint-Malo, Francia. pp. 15-25.
- Gutiérrez-Cabanillas J.I., Olivera J.M., de Tena J.M., Zajara L., Gil J., Llerena-Ruiz J.L., Ordiales E. (2022). TomPrint Operational Group: cloud computing tool for calculating the carbon footprint of processing tomato. *Acta Horticulturae* 1351: 291-298. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1351.42>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2003). Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC. 590 pp.

- IPCC (2021). Summary for policymakers. En: Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. (Ed. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K., Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou), pp. 3-32. Cambridge University Press Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Jaiswal B., Agrawal M. (2020). Carbon footprints of agriculture sector. En: Carbon Footprints. Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes (Ed. Muthu S.), pp 81-99. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7916-1_4
- Keenan T.F., Williams C.A. (2018). The terrestrial carbon sink. Annual Review of Environment And Resources 43: 219-243. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030204>
- Lazzerini G., Manzini J., Lucchetti S., Nin S., Nicese F.P. (2022). Greenhouse Gas Emissions and Carbon Sequestration from Conventional and Organic Olive Tree Nurseries in Tuscany, Italy. Sustainability 14: 16526. <https://doi.org/10.3390/su142416526>
- MAPA (2022). Anuario Estadística 2022, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 1311 pp. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/estadistica/pags/anuario/2022/GLOBAL_2022/AE_2022.pdf (Consultado: 26 de febrero 2024).
- Mesa del Tabaco (2020). Informe sobre la contribución económica y social del sector de tabaco en España y tendencias en el marco regulatorio del sector. 85 pp. Disponible en: <https://www.mesadeltabaco.com/public/Attachment/2020/12/MesadelTabaco-InformesobrelacontribucioneconomicaysocialdelsectordetabacoenEspa2020.pdf> (Consultado 26 de febrero 2024).
- Miranda R. (2018). El sector del tabaco en rama: una visión global desde Extremadura. En: La agricultura y ganadería extremeñas, informe 2017. (Ed. Coletto Martínez J.M., González Blanco R., Muslera Prado E., Pulido García F.) pp. 101-112. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Escuela de Ingenierías Agrarias y Caja de Badajoz. España.
- MITECO (2023). Calculadoras del Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO). Disponibles en: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/calculadoras.html> (Consultado: 19 febrero 2024).
- Nikolić-Popadić S. (2022). Prohibition on the burning of crop residues on agricultural land. Glasnik Advokatske komore Vojvodine 94(2): 465-510.
- Pandey D., Agrawal M., Pandey J.S. (2011). Carbon footprint: current methods of estimation. Environmental monitoring and assessment 178: 135-160. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1678-y>
- Parvin S., Uddin S., Tausz Posch S., Armstrong R., Tausz M. (2020). Carbon sink strength of nodules but not other organs modulates photosynthesis of faba bean (*Vicia faba*) grown under elevated [CO₂] and different water supply. New Phytologist 227(1): 132-145. <https://doi.org/10.1111/nph.16520>
- Rawat A., Mali R.R. (2013). Phytochemical properties and pharmacological activities of *Nicotiana tabacum*: A review. Indian Journal Of Pharmaceutical And Biological Research 1: 74-82. <https://doi.org/10.30750/ijpbr.1.2.9>
- Rivero P., Ramajo J., Miranda F.J. (2022). Estudio de costes de producción del tabaco en Extremadura, su viabilidad y su incidencia económica en las zonas rurales donde se cultiva. Consejería de Agricultura. Junta de Extremadura. 50 pp.
- Sachs J., Kroll C., Lafortune G., Fuller G., Woelm F. (2021). Sustainable development report 2021. Cambridge University Press, Cambridge. 518 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009106559>
- Wiedmann T., Minx J. (2008). A definition of 'Carbon Footprint'. En: Ecological Economics Research Trends (Ed. Pertsova C.C.), pp. 1-11. Nova Science Publishers, Hauppauge NY, USA.
- Yan M., Cheng K., Luo T., Yan Y., Pan G., Rees R.M. (2015). Carbon footprint of grain crop production in China - based on farm survey data. Journal of Cleaner Production 104: 130-138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.058>

- Yan Z., Wang J., Liu Y., You Z., Zhang J., Guo F., Gao H., Li L., Wan S. (2023). Maize/peanut intercropping reduces carbon footprint size and improves net ecosystem economic benefits in the Huang-Huai-Hai Region: A four-year study. *Agronomy* 13: 1343. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051343>
- Yang J., Chen J., Yang R., Tang J., Huang H. (2015). Research progress of factors influencing the yield and quality of flue-cured tobacco. *Agricultural Science & Technology* 16: 820-825.
- Zermeño-González A., Ríos-Estudillo J.A., Gil-Marín J.A., Cadena-Zapata M., Villarreal-Quintanilla J.A. (2011). Dinámica del flujo de bióxido de carbono y de energía sobre un pastizal natural del norte de México. *Bioagro* 23(1): 35-42.
- Zhang L., Zhang X., Ji H., Wang W., Liu J., Wang F., Xie F., Yu Y., Qin Y., Wang X. (2018). Metabolic profiling of tobacco leaves at different growth stages or different stalk positions by gas chromatography-mass spectrometry. *Industrial Crops and Products* 116: 46-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.041>.
- Zhang Y., Wang H., Zhou T., Li Z., Jia X. (2022). Extended carbon emission pinch analysis for the low-carbon tobacco industry. *Energies* 15: 4611. <https://doi.org/10.3390/en15134611>

(Aceptado para publicación el 6 de junio de 2024)

Evaluación de la lixiviación potencial de nutrientes en un suelo calcáreo fertilizado con gallinaza

María Rosa Yagüe^{1,*}, Jesús Ángel Betrán², Pablo Bruna³
y María Carmen Lobo¹

¹ Área de Investigación Agroambiental. Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA), Finca El Encín Autovía A-2 Km 38,2; 28805 Alcalá de Henares Madrid.

² Laboratorio Agroambiental, Av. Montañana, 1005, 50192 Zaragoza.

³ Centro de Transferencia Agroalimentaria, Av. Movera, s/n, 50194 Zaragoza.

Resumen

En este trabajo se evalúa el riesgo potencial de lixiviación de nutrientes al utilizar diferentes estrategias de fertilización con gallinaza fresca de puesta como abonado de fondo sobre un suelo calcáreo con alto contenido de fósforo (P) disponible. Los tratamientos fueron: fertilización mineral (M1: 61 kg N ha⁻¹), dos tratamientos con gallinaza (M2: 105 kg N ha⁻¹ y M3: 210 kg N ha⁻¹) y un tratamiento en el que se combinó la fertilización mineral con gallinaza (M4: 359 kg N ha⁻¹). Dos meses después de la fertilización se realizó un ensayo en columnas de lixiviación de 0,30 m de altura. La conductividad eléctrica en el primer lixiviado fue mayor en el tratamiento M4 (0,90 dS m⁻¹), y fue descendiendo en lixiviados posteriores, con valores similares entre tratamientos (~0,20 dS m⁻¹). Este patrón se observa en la concentración de NO₃⁻ (M4: 870 mgL⁻¹; resto tratamientos entre 440-593 mg L⁻¹ en el primer lixiviado) y en el Cl⁻. El contenido en PO₄⁻³ es significativo en los últimos lixiviados con valores de entre 30 y 75 mg L⁻¹, sin diferencias entre los tratamientos, asociado al alto contenido de P disponible en el suelo. Las pérdidas de NO₃⁻ en el suelo se correlacionan con su contenido inicial (72-75 % del N-lixiviado en el primer riego) independientemente de la forma de aplicación del N (mineral u orgánica). Del mismo modo, las pérdidas de P disponible en el suelo están asociadas con su contenido inicial. Los resultados avalan la necesidad de realizar una gestión del riego con la fertilización a dosis agronómicas, para evitar la pérdida de nutrientes y el consiguiente riesgo de eutrofización.

Palabras clave: Amonio, aniones, columnas de drenaje, fertilización orgánica, nitrato, P-Olsen.

Evaluation of the potential leaching of nutrients in a calcareous soil fertilized with laying hen manure

Abstract

In this work, the potential risk of nutrient leaching is evaluated when using different fertilization strategies with fresh laying hen manure before sowing on a calcareous soil with a high phosphorus (P) available content. The treatments were: mineral fertilizer (M1: 61 kg N ha⁻¹), two treatments only with laying hen manure (M2: 105 kg N ha⁻¹ y M3: 210 kg N ha⁻¹), and one combined mineral fertilizer and laying

* Autor para correspondencia: mryaguue@coial.org

Cita del artículo: Yagüe M.R., Betrán J.A., Bruna P., Lobo M.C. (2024). Evaluación de la lixiviación potencial de nutrientes en un suelo calcáreo fertilizado con gallinaza. ITEA-Información Técnica Económica Agraria 120(4): 325-343. <https://doi.org/10.12706/itea.2024.008>



hen manure (M4: 359 kg N ha⁻¹). Two months after fertilization, a laboratory leaching columns assay was performed with the 0.30 m height. The electrical conductivity in the first drainage was higher in the M4 treatment (0.90 dS m⁻¹) than in the rest of the treatments and it decreased in subsequent drainages with similar values between treatments (~0.20 dS m⁻¹). This pattern is observed in the concentration of NO₃⁻ (M4: 870 mg L⁻¹; other treatments between 440-593 mg L⁻¹ in the first leaching) and in the Cl⁻ ion. A significant PO₄³⁻ content was detected in the last three drainages with values between 30 and 75 mg L⁻¹, not differences between treatments, associated with a high content of available P in the soil. The losses of NO₃⁻ in the soil are correlated with its initial content in the soil, (72-75 % of N leached in the first irrigation) associated with the dose, not the form of N application (mineral or organic). Likewise, the loss of available P in the soil is associated with its initial content. The results support the need to carry irrigation management with fertilization at agronomic doses, to avoid the loss of nutrients and the consequent risk of eutrophication.

Keywords: Ammonium, anions, column drainage, organic fertilization, nitrate, Olsen-P.

Introducción

La fertilización con estiércoles en tierras agrícolas es una práctica habitual. En el caso del estiércol de gallina, España es el cuarto país de la Unión Europea con alrededor del 13 % del censo de gallinas ponedoras. El censo de aves en España se sitúa en 47,3 millones de plazas en 2022, alrededor del 68 % en jaula (MAPA, 2023). El consumo de huevo se ha incrementado en la última década y se prevé que continúe esta tendencia en los próximos años, dado que se trata de una fuente de proteína animal a bajo coste.

La utilización de estiércoles y/o purines, subproductos procedentes de actividades agrarias, como fertilizantes en cultivos permite el reciclado de nutrientes en el sistema agrario (Real Decreto 637/2021), y está contemplado en el Plan Europeo de Economía Circular para minimizar y reducir los residuos agrarios en el camino hacia una agricultura sostenible (COM/2015/0614). La utilización de estiércol de aves procedente de la cría intensiva tiene impactos en el medio ambiente (aire, suelo y agua; e.g. pérdidas de PO₄⁻³ y NO₃⁻ a las aguas, cuando es aplicado como fertilizante) y en la salud humana (Kyakuwaire et al., 2019; Gržinić et al., 2023). La gallinaza se caracteriza por ser un material con un alto

contenido en nutrientes esenciales para los cultivos (Rees et al., 2011; Løes, 2017). El estiércol fresco de gallina de puesta "gallinaza" tiene un alto contenido de nitrógeno (N) en forma de ácido úrico que se convierte en urea y que se transforma rápidamente en NH₄⁺. Debido al alto contenido de N mineral (entre 60-80 %) (Chadwick et al., 2000) y la baja relación C/N, se produce una rápida transformación del NH₄⁺ a NO₃⁻ en pocas semanas tras su aplicación en campo (Castellanos y Pratt, 1981; Chadwick et al., 2000). El NO₃⁻ está fácilmente disponible para el cultivo y es susceptible de ser lixiviado. El fósforo (P) disponible en el estiércol de gallinaza oscila entre 60-90 % (Parker et al., 1959; Mullins et al., 2005), y el potasio (K) presenta valores próximos al 90 % (Parker et al., 1959).

La fertilización con estiércol de aves además de aportar nutrientes para los cultivos, aporta al suelo materia orgánica como fuente de carbono y contribuye a la mejora de sus propiedades físicas (e.g. infiltración; Adeyemo et al., 2019; Romero Lima et al., 2000).

La patata (*Solanum tuberosum* L.) es una de las principales fuentes de alimentación humana, tras el trigo, maíz y arroz (FAO, 2012). En varios estudios de fertilización con gallinaza en cultivos de patata que evaluaron su efecto en el rendimiento, obtuvieron igual o

mayor producción y mejor calidad de tubérculo que utilizando la fertilización mineral, por lo que puede sustituir total o parcialmente a la fertilización mineral (Luna Muriillo et al., 2016; Peñaloza et al., 2019; Romero Lima et al., 2000).

La dosis máxima de N permitida para zonas vulnerables y no vulnerables procedente de fuente orgánica es de 170 y 210 kg N ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente, según la Directiva Europea de Nitratos (Directiva 91/676/CEE).

Actualmente, los agricultores intentan suplir parte de las necesidades de nutrientes de los cultivos con la fertilización con gallinaza en fondo, debido a la disponibilidad de este estiércol en la zona, y aportan el resto de las necesidades de N con fertilización mineral en cobertera/s. En el caso de la fertilización mineral con N en cobertera, con la finalidad de sincronizar los aportes y necesidades del cultivo, esta estrategia les permite además de garantizar la disponibilidad de N para el cultivo minimizar las pérdidas de N y, por tanto, reducir el impacto medioambiental.

En suelos cultivados que han recibido fertilizantes orgánicos durante décadas utilizando el criterio del N para ajustar la fertilización, el P aportado frecuentemente excede la demanda de los cultivos, resultando en una acumulación paulatina de este elemento en el suelo. La excesiva acumulación de P durante décadas con el criterio de fertilización con N, no es dañina para los cultivos (Peterson et al., 1994), pero puede conducir a problemas ambientales por lixiviación desde el suelo al agua, bien en forma disuelta o adherido a las partículas de suelo (Elliott et al., 2005) pudiendo causar la eutrofización de las aguas. El P es generalmente el nutriente limitante en los ecosistemas acuáticos (Sharpley y Rekolainen, 1997; Carpenter et al., 1998) debido a la presencia de N en forma de NO₃⁻.

En suelos calcáreos de textura fina con alto contenido de arcillas el P queda adsorbido y el alto contenido de carbonatos produce la

retrogradación del P, por lo que se acumula en el suelo como fosfato dicálcico y tricálcico (HPO₄Ca y (PO₄)₂Ca₃). El P se lixivia cuando este equilibrio se modifique de modo que el P previamente adsorbido se libera en la solución del suelo o el P adicional aplicado ya no pueda ser adsorbido. El P aplicado al suelo es arrastrado con el agua simplemente porque la mayoría de los sitios de adsorción potenciales del suelo están ocupados por aportes de P del pasado, el llamado “fósforo heredado” (Jarvie et al., 2013; Schmieder et al., 2018).

En el intento de establecer niveles críticos de P en el suelo en relación con las pérdidas de P en aguas de escorrentía y lixiviación se utilizan las metodologías que se basan esencialmente en relaciones entre el contenido de P en el suelo, determinado por un método de uso agronómico (p.e. en suelos calcáreos la determinación de P disponible mediante el método Olsen), y las pérdidas de P en el agua. Se establece un valor por encima del cual el riesgo de pérdida de P es muy elevado, que se denomina “punto de cambio o crítico” (Heckrath et al., 1995).

Los fosfatos pueden existir en su forma más simple como (orto)fosfato (PO₄⁻³), forma de P que es utilizada por plantas, bacterias y algas. El P se considera un nutriente limitante para aguas con alto contenido de NO₃⁻, por lo que su aporte es desencadenante de la eutrofización.

En condiciones de campo la lixiviación de nutrientes es difícil de evaluar debido a la dispersión difusa de nutrientes procedente de las fuentes agrarias, por la dificultad de medir el volumen de agua lixiviada por estar asociada a las propiedades físicas de los suelos (hidrogeología), y también es difícil conocer en ocasiones el volumen de agua aplicada, por lo que se hace complejo cuantificar las pérdidas de nutrientes. La utilización de ensayos en columnas de lixiviación en laboratorio es una herramienta útil para poder evaluar pérdidas de nutrientes en los suelos

tratados con diferentes tipos de fertilización. Con esta metodología se puede controlar el agua aportada bajo las mismas condiciones físicas del suelo, posteriormente medir el volumen drenado y la concentración de los nutrientes en el agua de lixiviado.

El objetivo del trabajo fue evaluar en un suelo calcáreo, con alto contenido en P asimilable y diferentes tratamientos fertilizantes, el riesgo potencial de lixiviación de N en forma mineral (NO_3^- y NH_4^+), PO_4^{3-} , Cl^- y SO_4^{2-} , en un ensayo en columnas de lixiviación en condiciones de laboratorio.

Material y métodos

Caracterización del suelo y la gallinaza

El suelo utilizado para realizar el ensayo de lixiviación de columnas procedía de un ensayo agronómico situado en Mainar (Zaragoza (España), $41^\circ 10' 38'' \text{ N}$; $1^\circ 19' 4'' \text{ W}$). El muestreo de caracterización del suelo se realizó el 18 de febrero 2020 a dos profundidades (0-0,30 y 0,30-0,60 m de profundidad). La textura del suelo se clasifica como franco arcillo limosa (USDA) en todo el perfil, el suelo presentaba un pH básico-alcálico y alto contenido de carbonatos, la prueba previa de salinidad un valor de $0,2 \text{ dS m}^{-1}$, contenido medio de materia orgánica y alto contenido en P y K disponibles (Tabla 1).

En la parcela el agricultor desde al menos 10 años realiza la fertilización con gallinaza de puesta y complementando con fertilización mineral, descrito en este ensayo como estrategia habitual por parte del agricultor (tratamiento M4). Se realiza la rotación de cultivos de 4 años de maíz y 1 año de patata.

Se aplicaron al suelo diferentes dosis de estiércol de gallina de puesta (*Gallus gallus domesticus*), que procedía de una granja comercial próxima al ensayo. La gallinaza se

cogió directamente de la cinta de recogida de estiércol y se aplicó el mismo día en el campo, 25 de febrero de 2021. Durante la carga del remolque se tomó una muestra compuesta de la gallinaza y se envió al laboratorio para realizar el análisis de nutrientes (Tabla 2). La aplicación de gallinaza en suelos agrícolas, como la de cualquier estiércol, debe realizarse en fondo, y sólo es admisible para establecer posteriormente un cultivo.

Descripción de los tratamientos de fertilización

La dosis de N se estableció de acuerdo a las necesidades del cultivo de patata, $200\text{-}250 \text{ kg N ha}^{-1}$ para una producción estimada de $40\text{-}50 \text{ mg ha}^{-1}$, y la normativa en zonas no vulnerables, máximo de 210 kg N ha^{-1} procedente de fuentes orgánicas. La concentración de los nutrientes en la gallinaza se estimó según la Orden AGM/83/2021 del Gobierno de Aragón mediante los valores de la referencia Ziegler y Heduit (1991), $-10,5 \text{ kg N t}^{-1}$ de materia fresca, $10,4 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ t}^{-1}$ de materia fresca y $7,2 \text{ kg K}_2\text{O t}^{-1}$ de materia fresca— por lo que la dosis de gallinaza sería 20 mg ha^{-1} para 210 kg N ha^{-1} . Los agricultores de la zona aplican $\sim 20 \text{ mg ha}^{-1}$ de gallinaza y complementan con un abonado NPK para el cultivo de patata.

La fertilización con remolque esparcidor no permite aplicar dosis menores de 7 mg ha^{-1} . En base a estas premisas se estableció una dosis de fertilización mineral de N mínima, la dosis mínima que es posible aplicar con gallinaza fresca: 7 mg ha^{-1} ; la dosis que habitualmente aplica el agricultor: $\sim 20 \text{ mg ha}^{-1}$, complementada con abonado mineral NPK, y una dosis intermedia entre las anteriores, de 14 mg ha^{-1} .

El análisis de suelo antes de la aplicación indicó altos contenidos de P y K asimilables (Tabla 1). En el caso del tratamiento de únicamente fertilización mineral no se aportó P ni K.

Tabla 1. Características físico-químicas del perfil del suelo previo a la fertilización.
 Table 1. Physico-chemical characteristics of the soil profile before fertilization.

Parámetro	Profundidad (m)			
	0-0,30	0,30-0,60	0,60-0,90	0,90-1,20
Distribución de las partículas (USDA, g kg ⁻¹)				
Arena (2000 < Ø < 50 µm)	212,6	223,5	186,4	260,5
Limo grueso (50 < Ø < 20 µm)	139,7	133,3	125,3	56,7
Limo fino (20 < Ø < 2 µm)	287,4	283,3	306,6	319,3
Arcilla (Ø < 2 µm)	360,3	359,9	381,7	363,5
pH (agua; 1:2,5 [‡])	8,7 ± 0,5	8,8 ± 0,5	8,7 ± 0,5	8,8 ± 0,5
Conductividad eléctrica (1:5 [‡] ; dS m ⁻¹ , 25 °C)	0,2 ± 0,03	0,2 ± 0,03	0,2 ± 0,03	0,2 ± 0,03
Materia orgánica (%)	2,00 ± 0,25	1,20 ± 0,15	0,82 ± 0,10	0,52 ± 0,07
C/N	9,5	9,6	9,5	7,6
N total (%; Kjeldahl)	0,12	0,07	0,05	0,04
Fósforo (mg P kg ⁻¹ ; Olsen)	98 ± 16	42 ± 7	20 ± 3	13 ± 2
Potasio (mg K kg ⁻¹ ; NH ₄ OAc)	810 ± 136	576 ± 97	382 ± 64	226 ± 38
CaCO ₃ equivalente (%)	27 ± 4	29 ± 4	28 ± 4	32 ± 5
Caliza activa (‰)	7,1 ± 0,6	7,3 ± 0,6	8,2 ± 0,7	8,7 ± 0,7
Magnesio (NH ₄ OAc, mg kg ⁻¹)	200 ± 42	174 ± 36	162 ± 34	142 ± 30
Micronutrientes (EDTA, mg kg ⁻¹)				
Fe	23,40	25,80	23,00	26,60
Cu	1,18	0,90	0,90	0,70
Mn	17,74	16,48	13,92	12,62
Zn	4,40	3,54	2,26	5,28

Ø: diámetro aparente de partícula. [‡] Relación suelo: agua destilada. ± incertidumbre de laboratorio. C/N: calculado (se considera C orgánico el 58 % de la materia orgánica).

La distribución del fertilizante se realizó en bandas en relación a la distancia entre aspersores móviles; 17,5 m de ancho y 131 m de longitud, realizándose 3 réplicas de cada tratamiento, por lo que la superficie de cada subparcela fue de 560 m² (17,5 m ancho por 32 m de longitud).

La analítica de la gallinaza utilizada permite conocer la dosis real de nutrientes aplicada (Ver en material complementario, Tabla M1).

Las estrategias de fertilización de fondo fueron cuatro: 1) fertilización mineral, se aplicaron 132 kg ha⁻¹ de urea (46 % N) (M1: 61 kg N ha⁻¹) el 5 marzo 2021; 2) fertilización con ga-

Tabla 2. Características de la gallinaza aplicada como fertilización de fondo.
Table 2. Characteristics of laying hen manure fertilization applying at sowing.

Parametro	Valor medio (kg mg ⁻¹ smf)
Materia seca (105 °C, %)	29,8
Materia orgánica (calcinación, %)	21,7
N total (Kjeldahl, % sms)	5,0 (14,9)
N-NH ₄ ⁺ (% sms)	3,1 (9,2)
Fosforo total (% P ₂ O ₅ sms)	2,73 (8,1)
Potasio total (% K ₂ O sms)	3,00 (8,9)
Nutrientes secundarios (% sms)	
Calcio total (CaO)	8,4 (25,0)
Magnesio total (MgO)	0,88 (2,6)
Micronutrientes (mg kg ⁻¹ sms)	
Hierro total	620
Cobre total	46
Manganeso total	289
Zinc total	299

% sms expresado sobre materia seca. Fósforo, potasio, nutrientes secundarios y micronutrientes por ICP-OES. Entre paréntesis, datos expresados en kg mg⁻¹ de materia fresca, smf.

llinaza fresca a dosis de 7 t por hectárea (M2: 105 kg N ha⁻¹); 3) fertilización con gallinaza dosis de 14 mg ha⁻¹ (M3: 210 kg N ha⁻¹) y 4) fertilización con gallinaza y mineral, estrategia habitual por parte del agricultor, a dosis de gallinaza de 21 mg ha⁻¹ (315 kg N ha⁻¹), y se complementó con 730 kg ha⁻¹ de un abono triple (43,8 kg N ha⁻¹) con micronutrientes (Plus Master Fertiberia 6-10-20 con micronutrientes: MgO-2 %; azufre soluble en agua-13 %; boro-0,1 %; cobre-0,01 % y zinc-0,01 %) el 16 de marzo de 2021 (M4: 359 kg N ha⁻¹).

Descripción del ensayo de columnas de lixiviación

Las columnas utilizadas fueron de vidrio de 30 cm longitud y 4,5 cm diámetro, y se rell-

naron con 200 g de suelo previamente secado al aire y tamizado (5 mm), procedente de cada horizonte del suelo, que se colocó en su disposición original (0-0,30 y 0,30-0,60 m en longitud de la columna proporcional a las dos profundidades), sobre una capa de grava para facilitar la lixiviación y una malla para minimizar pérdidas de suelo (Ver en material complementario, Fig. M1). El diseño experimental fue en bloques al azar, con tres repeticiones por tratamiento.

El suelo utilizado procedía de un muestreo realizado el 12 de mayo de 2021 a dos profundidades 0-0,30 y 0,30-0,60 m (Ver en material complementario, Fig. M1), después de 76 días de la aplicación de las diferentes estrategias de fertilización de fondo en el ensayo en campo (25 de febrero aplicación de

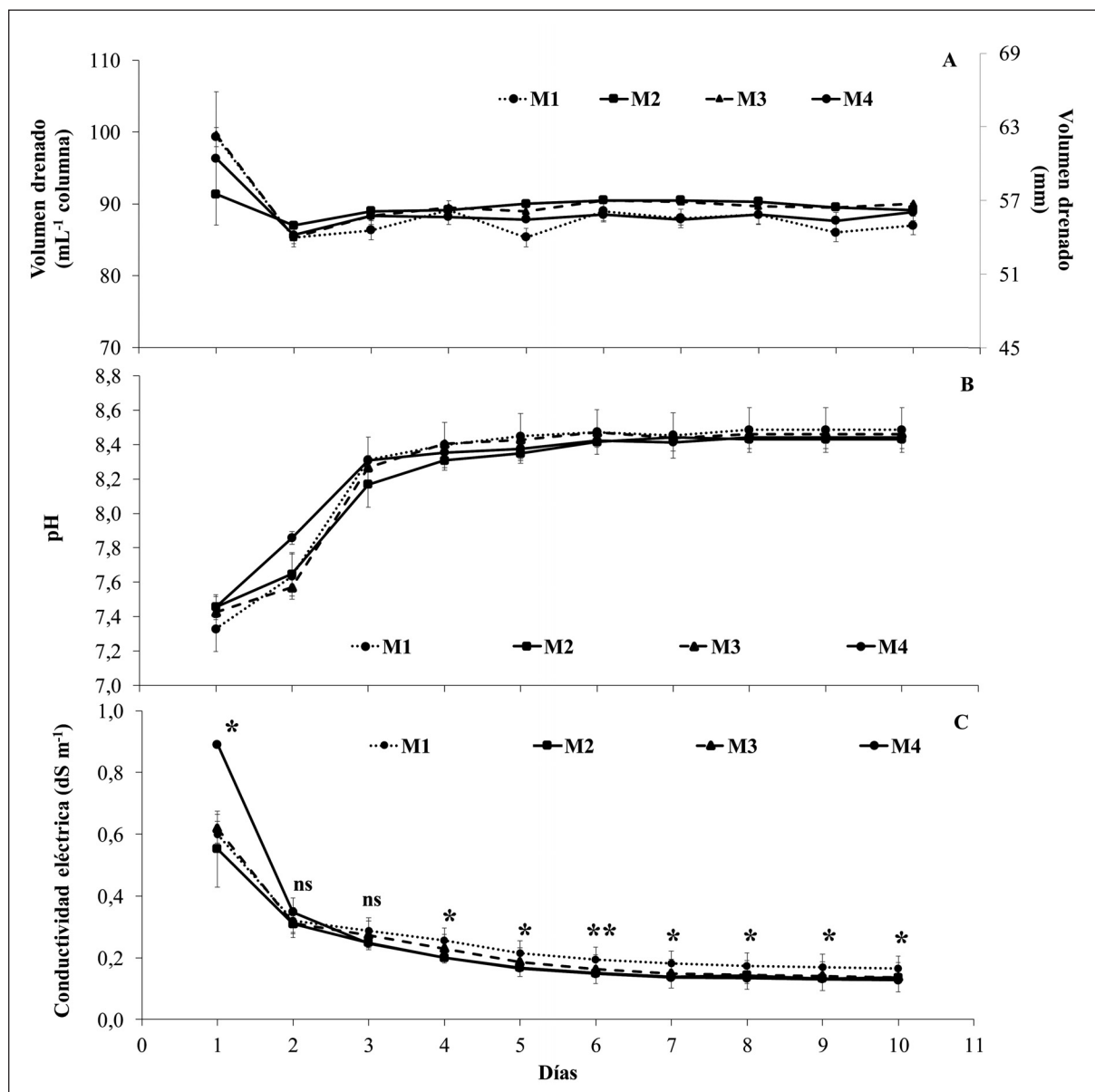


Figura 1. Evolución del lixiviado: volumen (A), pH (B) y conductividad eléctrica (C) en los distintos tratamientos de fertilización durante el ensayo con columnas de drenaje. Las barras verticales indican la desviación estándar ($n = 3$); * $0,05 \leq p < 0,01$; ** $0,01 \leq p < 0,001$; ns: no significativo.

Figure 1. Evolution of drainage: volume (A), pH (B) and electrical conductivity (C) in the different fertilization treatments during the drainage column experiment. Verticals bars indicate standard deviation ($n=3$); * $0.05 \leq p < 0.01$; ** $0.01 \leq p < 0.001$; ns: not significative.

gallinaza y 5 de marzo 2021 aplicación de fertilización mineral) con una precipitación acumulada de 99 mm en ese periodo. Cada muestra de suelo (3 muestras de suelo/réplicas por tratamiento) estaba compuesta de 3 puntos distribuidos al azar en cada subparcela muestreados con barrena en ambas profundidades. Una vez preparadas las columnas con el suelo, se colocaron en condiciones controladas en una cámara de incubación, a 25 °C y humedad ambiente ~60 % durante todo el ensayo. Inicialmente el suelo se saturó con agua destilada, posteriormente en cada uno de los 10 días siguientes se aplicó la misma cantidad de agua destilada (100 mL; equivalente a ~63 mm) produciéndose el drenaje libre según la metodología descrita por Gil-Díaz *et al.* (2014). En cada muestra de agua drenada se midió: volumen, pH, conductividad eléctrica (CE), y la concentración de NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} y Cl^- por cromatografía iónica y NH_4^+ mediante electrodo selectivo.

En el suelo, tanto en el momento inicial como en el final del ensayo, se determinó el contenido de los mismos aniones en extracto de suelo en agua por cromatografía iónica, y el P por el método Olsen.

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante el paquete estadístico del programa SAS v8 (SAS Institute, 1999-2001), a partir del análisis de varianza considerando los niveles de significación (*p*): * ($0,05 \leq p < 0,01$); ** ($0,01 \leq p < 0,001$); *** ($0,001 \leq p < 0,0001$). Los valores de *p* > 0,05, se consideran no significativos (NS). La separación de medias se realizó mediante el test DUNCAN.

Resultados y discusión

Efecto de los tratamientos fertilizantes en el contenido en nutrientes (N-NH_4^+ , N-NO_3^- y P-PO_4^{3-}) del suelo previo al ensayo de lixiviación

El contenido N-NH_4^+ fue poco relevante (<5 mg kg^{-1} de suelo) en todos los tratamientos y a las dos profundidades (Tabla 3). En cambio, el contenido de N-NO_3^- fue alto, lo que indica que en este periodo de 76 días (desde aplicación gallinaza al muestreo de suelo) ya ha ocurrido la transformación a NO_3^- de la

Tabla 3. Contenido de N-NO_3^- y P-PO_4^{3-} en distintos horizontes del suelo tras la aplicación del abonado de fondo (mineral y gallinaza) previo al ensayo de lixiviación en columnas.
Table 3. Content of NO_3^- -N and PO_4^{3-} -P in soil after sowing (mineral and laying hen manure) before leaching assay.

Tratamiento	kg $\text{N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$		kg $\text{P-PO}_4^{3-} \text{ ha}^{-1}$	
	0-0,30 m	0,30-0,60 m	0-0,30 m	0,30-0,60 m
M1	200 ± 19	153 ± 5	8,8 ± 0,3	4,9 ± 1,0
M2	141 ± 21	115 ± 11	8,8 ± 1,0	5,2 ± 1,6
M3	195 ± 8	130 ± 14	14,0 ± 1,0	7,5 ± 3,3
M4	210 ± 3	293 ± 49	6,5 ± 1,6	8,2 ± 4,9

± estándar desviación (n = 3). Densidad del suelo considerada 1350 g cm^{-3} .

urea aplicada con la fertilización mineral, así como de la urea y el N-NH_4^+ proveniente del ácido úrico en las aplicaciones procedente de la gallinaza. El contenido en N-NO_3^- del suelo (0-0,60 m) permite asegurar que se cubrirán las necesidades de N del cultivo, para un rendimiento esperado de cultivo de patata de 45-50 t ha⁻¹ (4,5-5 kg N t⁻¹; 1,5-2 kg P₂O₅ t⁻¹; 6-10 kg K₂O t⁻¹; López y López, 2011) estimadas en 200-250 kg N ha⁻¹; Tabla 3). En el caso del P en forma de (orto)fosfato PO₄⁻³, el contenido en la solución del suelo supone el 70 % de las necesidades del cultivo (60-75 kg P₂O₅ ha⁻¹), y con el contenido alto de P Olsen en el suelo inicial (>80 mg P kg⁻¹ suelo inicial), estaría garantizada la totalidad de las necesidades de P de la planta, aunque el contenido de carbonato cálcico del suelo es alto (27 %). En el caso del K, presenta un elevado contenido inicial >800 mg kg⁻¹ suelo (Tabla 1), suficiente para cubrir las necesidades del cultivo (270-300 kg K₂O ha⁻¹).

El contenido de NO₃⁻ (Tabla 3) en los tratamientos M1, M2, y M3 es mayor en la capa superficial (0-0,30 m) que en la capa inferior (0,30-0,60 m), pero con valores en altos >100 kg N ha⁻¹ en esta última por lo que es probable que el agua de las precipitaciones ocurrida en campo desde la aplicación de la gallinaza al muestreo de suelo (76 días, 99 mm) arrastrase parte de NO₃⁻ a la capa inferior. En el tratamiento M4, con dosis alta de nutrientes procedentes de la gallinaza y abonado mineral, se observa un mayor contenido de NO₃⁻ en la capa inferior respecto a la capa superficial, que se puede atribuir a una concentración de nutrientes aportados mayor que en los otros tratamientos. Este desplazamiento de NO₃⁻ podría estar asociado a las precipitaciones ocurridas la zona tras la aplicación de la gallinaza, antes del muestreo del suelo para el ensayo de lixiviación. Este efecto también se detecta en el contenido de PO₄⁻³ en tratamientos y profundidades. La patata puede alcanzar una profundidad de las raíces de 1 m, pero la distribución de raíces, y

por tanto su capacidad de absorción de agua y nutrientes en el perfil, está condicionada por el tipo de riego (Ahmadi et al., 2011).

Ensayo de lixiviación

Efecto de los tratamientos en el volumen de lixiviado, pH y conductividad eléctrica

El volumen drenado, excepto en el primer lixiviado, fue similar todos los días en todos los tratamientos, no observándose diferencias en el volumen lixiviado asociadas al tratamiento (Fig. 1A).

El pH de primer lixiviado es el más bajo (entre 7,3 y 7,5; Fig. 1B), y va incrementándose significativamente hasta el tercer riego, a partir del cual el pH permanece entre 8,3 y 8,5.

En relación a la salinidad del lixiviado, determinada mediante la medida de la CE, se observa en el primer lixiviado el mayor lavado de sales solubles, con diferencias entre tratamientos. El tratamiento M4 presentó valores de CE significativamente superiores que el resto de tratamientos, que fueron similares. A dosis altas de gallinaza se produce acumulación de sales en el suelo (Chinkuyu et al., 2002). A medida que transcurren los riegos, se produce en general el lavado de sales solubles sin observarse diferencias relevantes entre tratamientos y con un valor alrededor de 0,2 dS m⁻¹ (Fig. 1C).

Efecto de los tratamientos en las formas de nitrógeno lixiviado (NO₃⁻, NO₂⁻ y NH₄⁺)

La concentración de NO₃⁻ estuvo afectada por el tratamiento de fertilización (Figura 2A). En todos los tratamientos a medida que se suceden los riegos la concentración de NO₃⁻ disminuye en los lixiviados, asociada al movimiento del NO₃⁻ a través del flujo de agua por la columna de suelo.

En el primer día de lixiviación se producen las mayores concentraciones de NO₃⁻ en todos

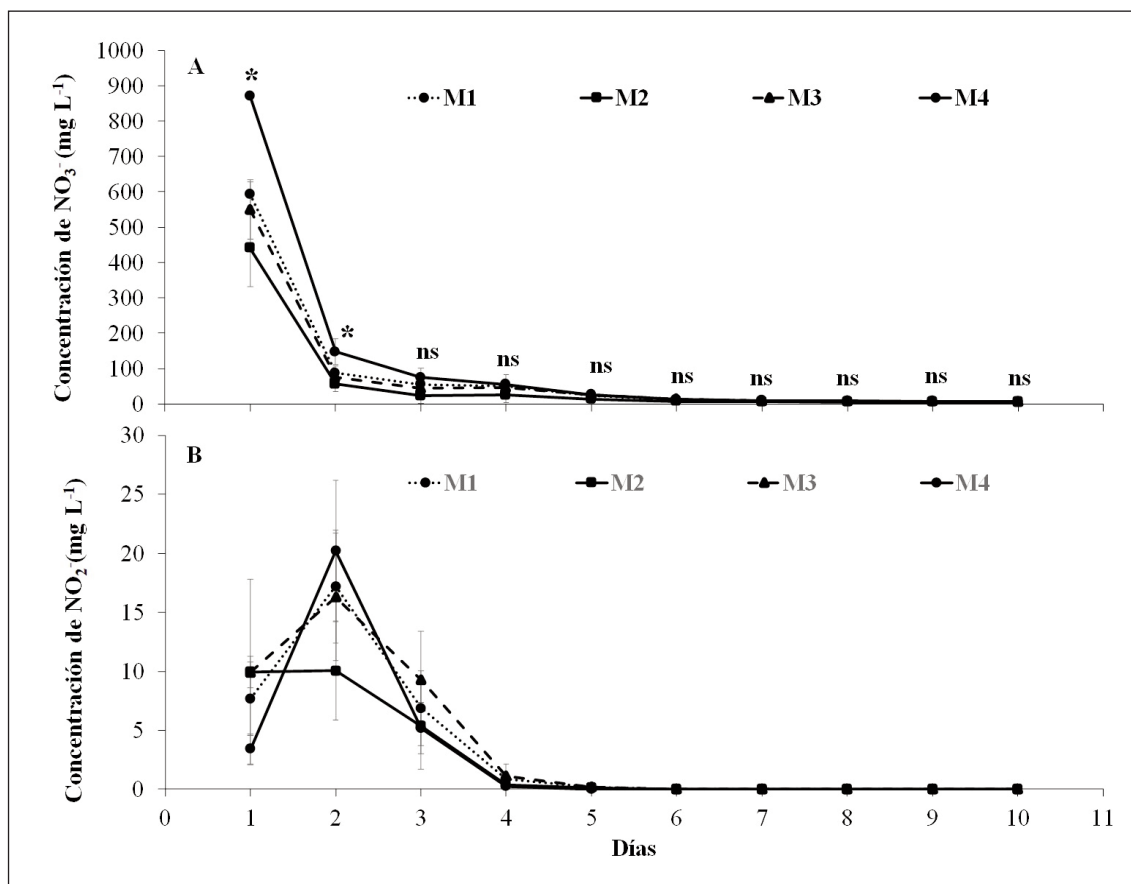


Figura 2. Evolución de la concentración de NO_3^- (A) y NO_2^- (B) en los distintos tratamientos de fertilización durante el ensayo con columnas de drenaje. Las barras verticales indican la desviación estándar ($n = 3$); * $0,05 \leq p < 0,01$; ns: no significativo.

Figure 2. Evolution of the concentration of NO_3^- (A) and NO_2^- (B) in the different fertilization treatments during the drainage column experiment. Vertical bars indicate standard deviation ($n = 3$); * $0.05 \leq p < 0.01$; ns: not significant.

los tratamientos (Fig. 2A). El tratamiento M4 presentó las mayores concentraciones de NO_3^- con valores próximos a $900 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$, esa fue la dosis mayor (50 % más de la dosis permitida de N total de fuente orgánica: $315 \text{ vs. } 210 \text{ kg N ha}^{-1}$, y complementada con 43 kg N ha^{-1} de fertilización mineral), respecto al resto de tratamientos que presentaron valores entre $600\text{-}400 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$, sin observarse diferencias entre ellos. En el segundo

lixiviado se reducen significativamente las concentraciones de NO_3^- , oscilando entre $80 \text{ y } 160 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$, manteniéndose el tratamiento M4 con mayor concentración que el resto de tratamientos. A partir del cuarto lixiviado es cuando todos los tratamientos descienden por debajo de $50 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$. El NO_3^- es un ion muy móvil que permite su lavado en el suelo cuando el agua atraviesa la columna o el perfil del suelo. Otros autores

han confirmado que las concentraciones más altas de NO_3^- ocurren en los primeros riegos en el suelo con más alto contenido en NO_3^- cuando se aporta gallinaza (Zarabi y Jalali, 2012; Chinkuyu et al., 2002). La previsión de lluvias y la gestión del riego son críticas en suelos con alto contenido de NO_3^- para evitar su percolación en el perfil del suelo.

La dosis mayor de gallinaza, M4, supuso las mayores pérdidas de NO_3^- , este resultado está de acuerdo con el obtenido en un estudio realizado en macetas con gallinaza de puesta realizado por Miralles del Imperial et al. (2012). Estos autores obtuvieron en los lixiviados las mayores pérdidas de NO_3^- en dosis $>300 \text{ kg N ha}^{-1}$. Asimismo, en ese estudio se detectaron pérdidas de NH_4^+ , debido a que el lixiviado se midió inmediatamente tras la aplicación de gallinaza.

El contenido de NH_4^+ en todos los lixiviados fue muy bajo $<3 \text{ mg L}^{-1}$, sin observarse diferencias entre tratamientos en ningún lixiviado (datos no mostrados). Estos bajos valores de NH_4^+ junto con las concentraciones altas de NO_3^- en el suelo indican que en el campo se produjo la transformación del N de la urea procedente de la fertilización mineral y del N en forma ureica y NH_4^+ aportados con la gallinaza aplicada en fondo dos meses antes del muestreo de suelo para el ensayo de lixiviación en columnas.

Cuando analizamos los resultados de las concentraciones de NO_2^- (Fig 2B), observamos que la concentración en general es baja ($<10 \text{ mg L}^{-1}$) e incluso no detectable ($<0,5 \text{ mg L}^{-1}$), excepto en el segundo lixiviado, en el que se alcanzan 20 mg L^{-1} , sin diferencias entre tratamientos en ningún lixiviado. Esto confirma que no hubo condiciones de anaerobiosis durante el ensayo y, por tanto, de desnitrificación. Si se produjo, esta fue en periodos muy breves y no supuso pérdidas relevantes de N en el suelo, la columna se saturaba en cada riego, pero las condiciones eran de drenaje libre.

Efecto de los tratamientos en la concentración de cloruros, sulfatos y fosfatos en el lixiviado

La concentración de Cl^- fue significativa según el tiempo de lixiviación (Fig. 3A). En el primer lixiviado hubo diferencias significativas entre el tratamiento M4 y el resto de tratamientos. En los dos siguientes lixiviados la concentración de Cl^- fue descendiendo observándose diferencias entre el tratamiento M4 y el resto de tratamientos. Tras los riegos sucesivos no hubo diferencias entre tratamientos. La dosis alta de gallinaza, M4, tuvo un efecto relevante en la concentración de Cl^- en el agua de drenaje, lo que podría producir un posible efecto fitotóxico en producción y calidad de la patata (Jans, 1998). Este hecho debería considerarse si se utiliza este tratamiento M4 así como el posible efecto en la germinación de semillas hortícolas sensibles a este ion, recurriendo a variedades más tolerantes a la concentración de cloruros (Mazur et al., 2013).

El azufre es un elemento secundario en la nutrición de las plantas, pero es relevante en el cultivo de la patata por su efecto en el rendimiento y la calidad (Sharma et al., 1998), la absorción por parte de la planta es mayoritariamente en forma de SO_4^{2-} que es susceptible de ser lixiviada. En cuanto a la concentración de SO_4^{2-} en el agua de drenaje no hubo diferencias entre tratamientos de fertilización en ningún lixiviado (Fig. 3B). En los primeros riegos la concentración de SO_4^{2-} fue más alta que en el resto de lixiviados, pero a medida que se sucedían los lixiviados este fue disminuyendo hasta no llegar a detectarse en los últimos. Esto se atribuye al lavado de sales de SO_4^{2-} del suelo, la adición de SO_4^{2-} con el fertilizante mineral de fondo (M4) no fue relevante.

La concentración de PO_4^{3-} (Fig. 3C) mostró un comportamiento muy diferentes al del resto de aniones, no detectándose en las aguas de

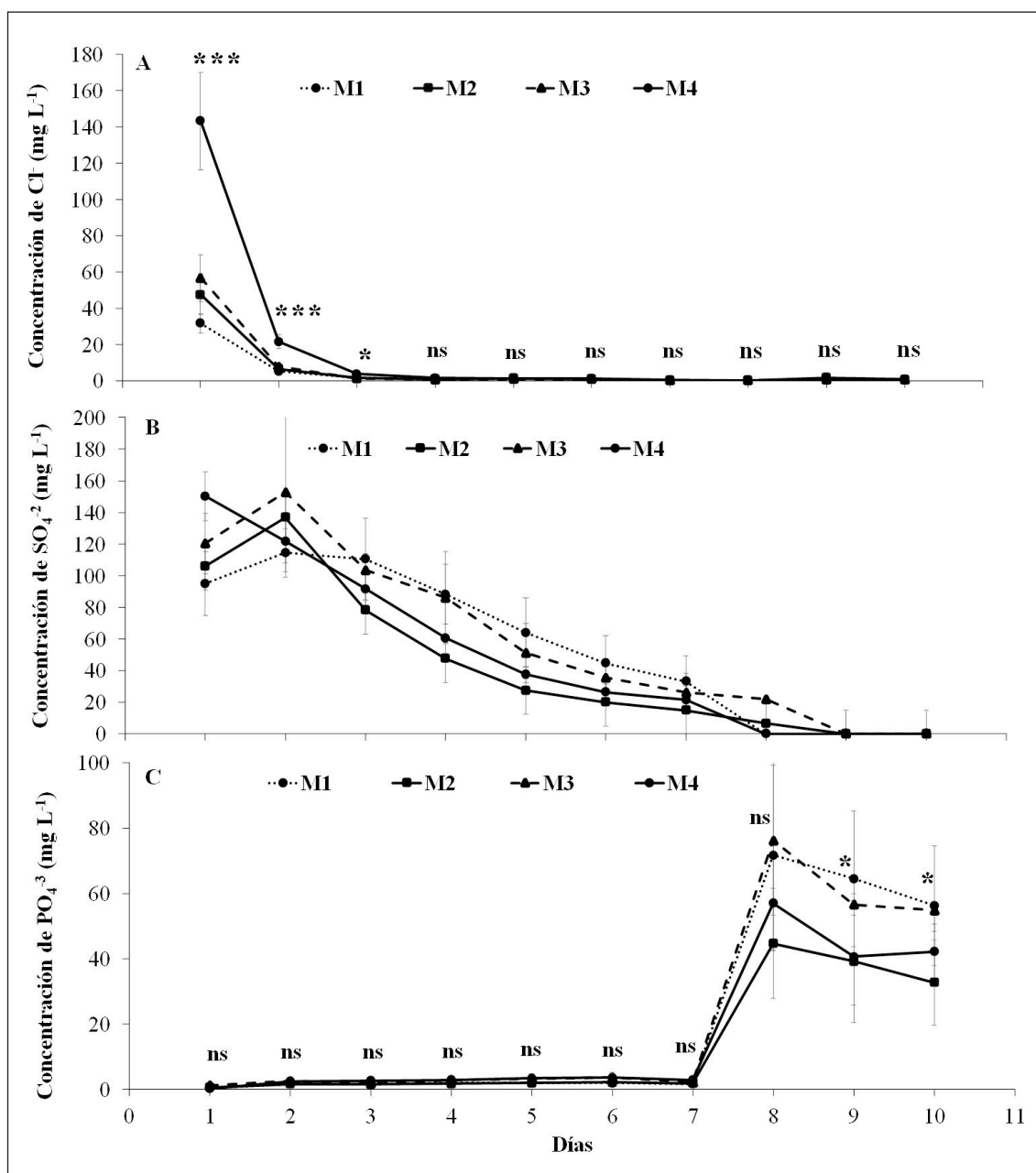


Figura 3. Evolución de la concentración de Cl^- (A), SO_4^{2-} (B) y PO_4^{3-} (C) en los distintos tratamientos de fertilización durante el ensayo con columnas de drenaje. Las barras verticales indican la desviación estándar ($n = 3$); * $0,05 \leq p < 0,01$; ns: no significativo.

Figure 3. Evolution of the concentration of Cl^- (A), SO_4^{2-} (B), and PO_4^{3-} (C) in the different fertilization treatments during the drainage column experiment. Vertical bars indicate standard deviation ($n = 3$); * $0.05 \leq p < 0.01$; ns: not significant.

lixiviación hasta el octavo lixiviado. En este lixiviado la concentración oscila entre el 82 y el 45 mg L⁻¹, sin diferencias entre tratamientos. Estaría, por tanto, asociado al efecto del alto contenido de P en el suelo que pasaría a la solución del suelo en forma de PO₄⁻³. En los dos últimos riegos la concentración de PO₄⁻³ en el agua de drenaje presenta una tendencia descendente en todos los tratamientos a medida que discurren los riegos. Los suelos de textura arcillosa, por su alta capacidad de intercambio, presentan gran capacidad de retención para el fosfato (Mabrouki et al., 1999). El P se mueve en el suelo por difusión. El suelo utilizado, además de una textura fina (franco arcillo limosa), que favorece la retención del P en las arcillas, presenta un contenido alto de carbonatos, con los que se compleja el P formando HPO₄Ca, insoluble. Aun así, se observa PO₄⁻³ en el lixiviado, que se puede explicar por una parte debido a que el suelo inicialmente presentaba un contenido alto de P disponible (Olsen) "fósforo heredado" en la capa superficial, y un enriquecimiento en la capa subsuperficial, lo que indica la movilidad del P disponible en el perfil del suelo (Tabla 1; de 93 mg kg⁻¹ suelo 0-0,30 m a 43 mg kg⁻¹ suelo 0,30-0,60 m) y, por otra parte, debido a los aportes de P soluble con gallinaza y fertilización mineral, que podría pasar a la solución del suelo y lixiviarse con el agua. En general, los estiércoles de aves presentan entre el 60-90 % del total del P en forma inorgánica (Mullins et al., 2005). Una gran proporción del P de estos estiércoles es P soluble en agua y, por tanto, susceptible de provocar pérdidas por escorrentía (Withers et al., 2001) y lavado (Sharpley y Moyer, 2000).

En el agua de lixiviado el P se analizó en forma de PO₄⁻³, pero podrían filtrarse a través del suelo otras formas de P (p.e. H₂PO₄⁻ y HPO₄⁻² en pH 7-9, y P orgánico disuelto, P particulado), pero se requeriría un estudio más detallado de estas formas de P en el agua.

Cambios en pH, CE, N-NO₃⁻ y P disponible en el suelo tras la lixiviación

Las concentraciones de aniones en los extractos de suelo tras el ensayo de lixiviación fueron bajas, sin observarse diferencias relevantes entre tratamientos (Ver en material complementario, Tabla M2).

Tras el periodo de lixiviación, en general el pH del suelo se incrementa ligeramente en profundidad. Aunque las diferencias son significativas, estas son cuantitativamente poco relevantes. Tras el ensayo, la CE en el suelo presenta valores muy bajos sin observarse diferencias entre tratamientos y profundidades (Tabla 4), debido al lavado de sales solubles en los sucesivos riegos (Fig. 1B).

Tras el ensayo de lixiviación, las concentraciones de NO₃⁻ en el suelo fueron bajas, no observándose diferencias entre tratamientos en cada profundidad, con valores entre 3 y 9 mg L⁻¹ en extracto de suelo (1:2,5), lo que indica que el proceso de lavado de NO₃⁻ fue similar en todos los tratamientos.

La masa de N-NO₃⁻ lixiviada fue entre el 86 y el 95 % del contenido N-NO₃⁻ inicial en el suelo, calculadas las pérdidas como diferencia entre masa inicial y final de N-NO₃⁻. La cantidad de N-NO₃⁻ lixiviada se correlaciona significativamente con el contenido inicial de N-NO₃⁻ en el suelo, independientemente de su origen mineral u orgánico (Fig. 4). Las pérdidas de NO₃⁻ ocurren mayoritariamente en el primer lixiviado, entre el 73-75 % del N-NO₃⁻ lixiviado en total, y se correlacionan significativamente con respecto al contenido inicial en el suelo (R²: 0,99; p < 0,001). En este sentido, el manejo del riego resulta determinante en el control de la lixiviación de NO₃⁻, siendo particularmente crítico cuando el suelo presenta altas concentraciones de NO₃⁻. La alta solubilidad del NO₃⁻ en agua favorece su lavado con el flujo de agua en el perfil, independiente de su origen mineral u orgánico (gallinaza).

Tabla 4. Valores medios de pH y conductividad eléctrica (CE) en el suelo al inicio y final del ensayo de lixiviación en columnas.

Table 4. Mean value pH and electrical conductivity (CE) of soil at the beginning and end of the column leaching experiment.

Tratamiento	Profundidad (m)	pH (1:2,5)		CE (dS m ⁻¹ ; 1:2,5)	
		Inicial	Final	Inicial	Final
M1	0-0,30	8,17 ± 0,09 ^c	8,54 ± 0,08 ^{ab}	0,31 ± 0,09 ^{bc}	0,04 ± 0,003
	0,30-0,60	8,35 ± 0,18 ^{abc}	8,62 ± 0,06 ^a	0,26 ± 0,18 ^{bc}	0,04 ± 0,000
M2	0-0,30	8,36 ± 0,14 ^{bc}	8,41 ± 0,05 ^{ed}	0,26 ± 0,14 ^{bc}	0,04 ± 0,003
	0,30-0,60	8,42 ± 0,06 ^{ab}	8,50 ± 0,02 ^{bcd}	0,24 ± 0,06 ^c	0,04 ± 0,003
M3	0-0,30	8,32 ± 0,10 ^{abc}	8,38 ± 0,00 ^e	0,34 ± 0,10 ^b	0,04 ± 0,002
	0,30-0,60	8,51 ± 0,12 ^a	8,52 ± 0,06 ^{bc}	0,26 ± 0,14 ^{bc}	0,04 ± 0,001
M4	0-0,30	8,23 ± 0,14 ^{bc}	8,44 ± 0,05 ^{cde}	0,42 ± 0,14 ^a	0,04 ± 0,001
	0,30-0,60	8,21 ± 0,12 ^{bc}	8,47 ± 0,04 ^{bcd}	0,47 ± 0,12 ^a	0,05 ± 0,001
Significación		*	***	***	ns

1:2,5; ratio suelo: agua destilada; ± estándar desviación (n = 3). Letras diferentes entre tratamientos en cada columna indican diferencias significativas * 0,05 ≤ p < 0,01; *** 0,001 ≤ p < 0,0001; ns: no significativo p > 0,05.

Cuando analizamos la variación del contenido de P disponible en el suelo al final del ensayo, aunque hay alta variabilidad entre repeticiones, son significativas las pérdidas de P asociado al mayor contenido de P en el suelo inicial (R²: 0,90; p < 0,001; Fig. 5). Estas mayores pérdidas de P disponible se producen a medida que se incrementa el contenido en P disponible inicial en el suelo, en nuestro caso se observa este incremento a contenidos >80 mg P kg⁻¹ suelo, independientemente de su aporte mineral u orgánico (gallinaza). Esto podría ocurrir en contenidos de P disponible inferiores a 80 mg kg⁻¹, debido a la alta variabilidad entre réplicas (50-60 mg kg⁻¹; Fig. 5). Existen estudios que evalúan el riesgo de lavado de P en relación al contenido de P disponible en el suelo, en particular el “*punto de cambio*”, donde se incrementan las pérdidas de P en el lixiviado. Heckrath et al. (1995),

en suelo con textura arcillo-limosa con diferentes contenidos de P disponible, determinaron el “*punto de cambio*” alrededor a 60 mg P kg⁻¹ en un ensayo agronómico en condiciones de campo. En suelos calcáreos un ensayo en columnas de lixiviado realizado por Jalali y Jalali (2017), mostró que el “*punto de cambio*” se sitúa en un rango entre 27 y 63 mg P kg⁻¹. Estos valores están de acuerdo con los resultados obtenidos recientemente por Ortiz et al. (2023), en suelos calcáreos de textura fina y condiciones Mediterráneas en riego con alta carga ganadera de porcino. Estos autores sitúan el “*punto de cambio*”, con riesgo de lavado a capas inferiores, en concentraciones de P disponible (P-Olsen) en el suelo de 80 mg P kg⁻¹, indicando que, a contenidos menores (53 mg P kg⁻¹) ya se presenta un escenario de riesgo de lixiviación.

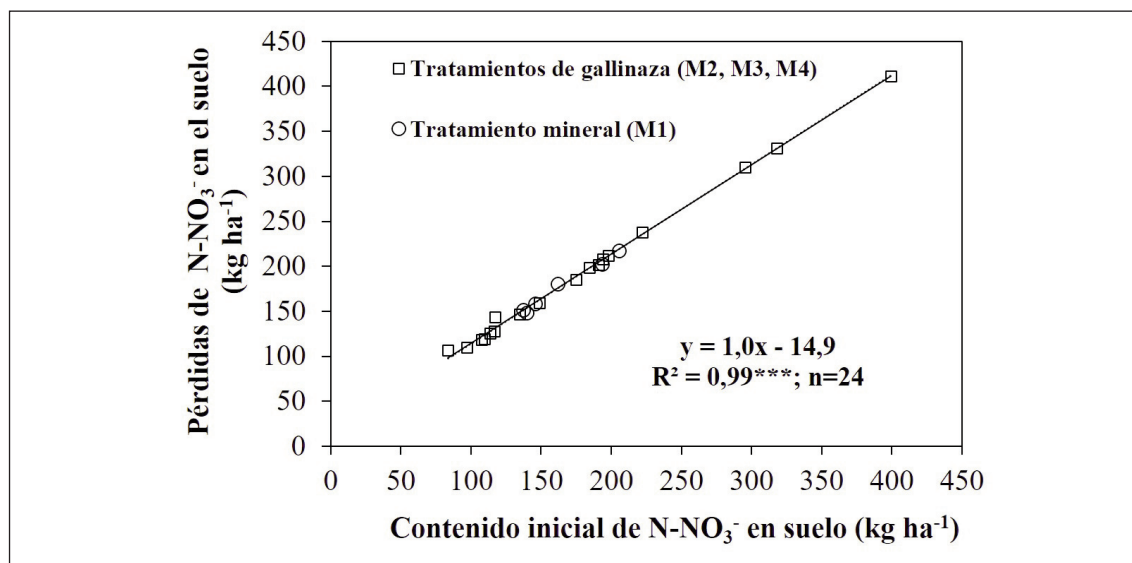


Figura 4. Relación entre el contenido N-NO_3^- (kg N ha^{-1}) en el suelo inicial en cada profundidad y las pérdidas de N-NO_3^- (kg N ha^{-1}) calculadas como diferencia entre su contenido al inicio y final del suelo en cada profundidad.*** $p < 0,001$.

Figure 4. Relationship between the NO_3^- -N content (kg N ha^{-1}) in the initial soil sampling at each depth and losses of NO_3^- -N (kg N ha^{-1}) calculated as the difference between its content at beginning and at the end of soil sampling in each.*** $p < 0.001$.

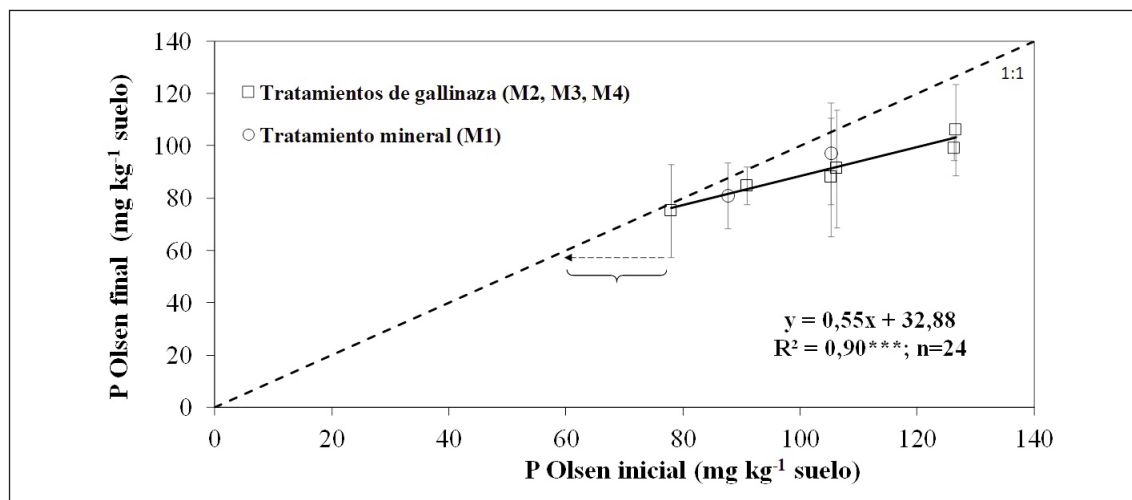


Figura 5. Relación entre el contenido P disponible (kg P ha^{-1}) en el suelo inicial y final medio de cada una de las profundidades. El corchete, indica la diferencia entre el valor mínimo y la recta 1:1, por lo que indicaría el contenido de P Olsen en el suelo en que podrían comenzar las pérdidas de P. Las barras verticales indican la desviación estándar ($n = 3$); ***: $p < 0,001$.

Figure 5. Relationship between P available content (kg P ha^{-1}) initial and final soil in each depth. The square bracket indicates the difference between the minimum value and the 1:1 line, so it would indicate the Olsen P content in the soil in which P losses could begin.

Vertical bars indicate standard deviation ($n = 3$); ***: $p < 0.001$.

En cualquier caso, concentraciones muy altas de P disponible en el suelo, pueden contribuir a incrementar las pérdidas de P en diferentes formas (solubles y/o particuladas) en el agua de lixiviación.

Una revisión de transferencia de P procedente de la fertilización a las aguas en Reino Unido (Withers *et al.*, 2017) concluye que el análisis de P en el suelo debería ser obligatorio en cuencas que están eutrofizadas o son sensibles, para garantizar que las reservas de P en el suelo se contabilicen como parte de la gestión de los fertilizantes minerales u orgánicos, y minimizar las pérdidas.

Conclusiones

- La gallinaza aporta altas cantidades de sales solubles cuando se aplica en dosis muy altas, que son lavadas durante los riegos. A la dosis permitida por la normativa, las sales solubles aportadas al suelo no son relevantes respecto a la fertilización mineral.
- En las condiciones del ensayo, el riesgo potencial de pérdidas por lavado de NO_3^- , PO_4^{3-} y P disponible (Olsen) en el suelo estuvo asociado al contenido inicial de estos nutrientes en el suelo, independientemente del tipo de fertilizante mineral u orgánico aplicado.
- En el suelo calcáreo utilizado con contenidos de P disponible (Olsen) $>80 \text{ mg kg}^{-1}$, y a las dosis aportadas de P con fertilizante orgánico o mineral se producen pérdidas por lavado de P disponible a capas inferiores del suelo, y por tanto, con riesgo de alcanzar el nivel freático, indicando la posibilidad de que ya se ha alcanzado “el punto de cambio”.
- Para optimizar agronómicamente la aplicación de gallinaza en el plan de abonado y establecer la dosis idónea, es necesario

conocer previamente el contenido en nutrientes (NPK) de la gallinaza y del suelo receptor. En nuestro caso la estimación del contenido de N total de gallinaza en base a referencias bibliográficas respecto al análisis de laboratorio supuso incrementar en un 43 % el aporte de nutrientes con la aplicación del estiércol.

- La gestión del riego con la fertilización a dosis agronómicas y considerando los nutrientes del suelo, es imprescindible para controlar la pérdida de nutrientes y evitar el riesgo de eutrofización.

Agradecimientos

Los autores agradecen al personal del Laboratorio Agroambiental, del Departamento de Agricultura, Ganadería y Alimentación, y al personal del laboratorio del Área Agroambiental del IMIDRA el soporte en los análisis, y a Pilar Liso su apoyo en las actividades de campo. Este trabajo ha recibido la ayuda RTA-2015-00060-C04-04 financiada por MICIU/AEI/ 10.13039/501100011033 FEDER *Una manera de hacer Europa* e IMIDRA (ayudas FP21-NMO y FP24-RECUPERA). M.R. Yagüe ha recibido la ayuda DOC 2015-021 financiada por MICIU/AEI/ 10.13039/501100011033 FSE *Invierte en tu futuro*.

Parte de esta información ha sido publicada en el congreso SECH 2022.

Referencias bibliográficas

- Adeyemo A.J., Akingbola O.O., Ojeniyi S.O. (2019). Effects of poultry manure on soil infiltration, organic matter contents and maize performance on two contrasting degraded alfisols in southwestern Nigeria. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* 8(1): 73-80. <https://doi.org/10.1007/s40093-019-0273-7>.

- Ahmadi S.H., Plauborg F., Andersen M.N., Sepaskhah A.R., Jensen C.R., Hansen S. (2011). Effects of irrigation strategies and soil on field grown potatoes: root distribution. *Agricultural Water Management* 98: 1280-1890. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.03.013>.
- Carpenter S.R., Caraco N.F., Correll D.L., Howarth R.W., Sharpley A.N., Smith V.H. (1998). Non-point pollution of surface water with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications* 8: 559-568. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0559:NPOSWW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0559:NPOSWW]2.0.CO;2).
- Castellanos J.Z., Pratt P.F. (1981). Mineralization of manure nitrogen-correlation with laboratory indexes. *Soil Science Society of American Journal* 45: 354-357. <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500020025x>.
- Chadwick D.R., Pain J.F., Chambers B.J., Williams J. (2000). Plant uptake of nitrogen from the organic nitrogen fraction of animal manures: a laboratory experiment. *Journal of Agricultural Science* 134: 159-168. <https://doi.org/10.1017/S0021859699007510>.
- Chinkuyu A.J., Kanwar R.S., Lorimor J.C., Xin H., Bailey T.B. (2002). Effects of laying hen manure application rate on water quality. *American Society of Agricultural Engineers. Transactions of the ASE* 45(2): 299-308. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.8524>.
- COM/2015/0614. Closing the loop – An EU action plan for the circular economy. Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Disponible en: <https://www.eumonitor.eu/9353000/1/j9vvik7m1c3gyxp/vjzpj6v9jiu8> (Consultado: 23 mayo 2024).
- Directiva 91/676/CEE del Consejo, de 12 de diciembre de 1991, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas* L375, de 31 de diciembre de 1991, pp. 1-8. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A31991L0676> (Consultado: 23 mayo 2024).
- Elliott H.A., Brandt R.C., O'Connor G.A. (2005). Runoff phosphorus losses from surface-applied biosolids. *Journal Environmental of Quality* 34: 1632-1639. <https://doi.org/10.2134/jeq2004.0467>.
- FAO (2012). *FAO Statistical yearbook. Food and Agricultural Organization of the United Nations*, Roma, Italia. 366 pp.
- Gil-Díaz M., Ortiz L.T., Costa G., Alonso J., Rodríguez-Membibre M.L., Sánchez-Fortún S., Pérez-Sanz A., Martín M., Lobo M.C. (2014). Immobilization and leaching of Pb and Zn in an acidic soil treated with zerovalent iron nanoparticles (nVI) physicochemical and toxicological analysis of leaches. *Water Air Soil Pollution* 225: 1990. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-1990-1>.
- Gržinić, G., Piotrowicz-Cieślak A., Klimkowicz-Pawlas A., Górny R.L., Ławniczek-Wałczyk A., Piechowicz L., Olkowska E., Potrykusa, M., Tankiewicz M., Krupka M., Siebielec G., Wolska, L. (2023). Intensive poultry farming: A review of the impact on the environment and human health. *Science of the Total Environment* 858: 160014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160014>.
- Heckrath G., Brookes P.C., Poulton P.R., Goulding K.W.T. (1995). Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment. *Journal of Environmental Quality* 24: 904-910. <https://doi.org/10.2134/jeq1995.00472425002400050018x>.
- Jalali M., Jalali M. (2017). Assessment risk of phosphorus leaching from calcareous soil using soil test phosphorus. *Chemosphere* 171: 106-117. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.042>.
- Jans A.C. (1998). Influencia de la fitotoxicidad del cloro en el rendimiento y composición química de la papa (*Solanum tuberosum* L. ssp *tuberosum* Hawkes) destinada a uso industrial [cv Yagana]. Valdivia. Universidad de Chile. 70 pp.
- Jarvie H.P., Sharpley A.N., Spears B., Buda A.R., May L., Kleinman P.J.A. (2013). Water quality remediation faces unprecedented challenges from "Legacy Phosphorus". *Environmental Science and Technology* 47: 8997-8998. <https://doi.org/10.1021/es403160a>.

- Kyakuwaire M., Olupot G., Amoding A., Nkedi-Kizza P., Basamba A.T. (2019). How safe is chicken litter for land application as an organic fertilizer?: A Review. *International Journal of Environmental Research Public Health* 16: 3521. <https://doi.org/10.3390/ijerph16193521>.
- Løes A.K. (2017). Laying-hens for soil fertilization. Norsok report. 32 pp. Disponible en: <https://orgprints.org/id/eprint/32518/1/NORS%C3%98K%20Rapport%20%20nr%2013%202017%20Laying%20hens%20for%20soil%20fertilization.pdf> (Consultado: 23 mayo 2024).
- López H., López P. (2011). Abonado de la patata. En: Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España Parte II, pp. 149-154. Edita Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid.
- Luna Murillo R., Espinosa Cunuhay K., Trávez Trávez R., Ulloa Méndez C., Espinoza Coronel A., Bejarano Albornoz A. (2016). Respuesta de variedades de papa (*Solanum tuberosum*, L.) a la aplicación de abonos orgánicos y fertilización química. *Ciencia y Tecnología*. 9(1): 11-16. <https://doi.org/10.18779/cyt.v9i1.160>.
- Mabrouki K., Rodríguez Maroto J.M., Cruz San Julián J.J. (1999). Estudio de la movilidad del fosfato a través del suelo: experiencias en discontinuo (batch) y en columnas. En: Estudios de la Zona No Saturada del Suelo (Eds. Muñoz-Carpena R., Ritter A., Tascón C.), pp. 95-100. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias: Tenerife, España.
- MAPA (2023). El sector de la avicultura de puesta en cifras. Principales indicadores económicos 2022 (julio 2023). Subdirección de producciones ganaderas y cinegéticas. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España. 93 pp.
- Mazur Z., Radziemska M., Tomaszewska Z., Świątkowski Ł. (2013). Effect of sodium chloride salinization on the seed germination of selected vegetable plants. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences (SREES)* 62(4): 444-453.
- Miralles de Imperial R., Martín J.V., Calvo R., Delgado M.M. (2012). Evaluación de nutrientes lixiviados bajo cultivo de maíz por el aporte de estiércoles de granjas avícolas. *ITEA-Información Técnica Económica Agraria* 108(3): 376-392.
- Mullins G., Joern B., Moore P. (2005). By-product phosphorus: sources, characteristics, and management. Madison, American Society of Agronomy. En: Phosphorus: agriculture and the environment (Ed. Sims J.T., Sharpley A.N.), pp. 829-879. American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr46.c26>.
- Orden AGM/83/2021, de 15 de febrero, por la que se designan y modifican las Zonas Vulnerables a la contaminación de las aguas por nitratos procedentes de fuentes agrarias en la Comunidad Autónoma de Aragón y por la que se aprueba el V Programa de Actuación sobre las Zonas Vulnerables de Aragón. Boletín Oficial de Aragón, Núm. 47, de 04 de marzo de 2021, pp. 9286-9330.
- Ortiz C., Pierotti S., Molina M.G., Boch-Serra A.D. (2023). Soil fertility and phosphorus leaching in irrigated calcareous soils of the Mediterranean Region. *Journal Environmental Monitoring and Assessment* 195: 1376. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11901-7>.
- Parker M.B., Perkins H.F., Fuller H.L. (1959). Nitrogen, phosphorus and potassium content of poultry manure and some factors influencing its composition. *Poultry Science* 38(5): 1154-1158. <https://doi.org/10.3382/ps.0381154>.
- Peterson A.E., Speth P.E., Corey R.B., Wright T.H., Schlecht P.L. (1994). Effect of twelve years of liquid sludge application on soil phosphorus level. En: Sewage sludge: Land utilization and the environment (Ed. Clapp C.E., Larson W.E., Dowdy R.H.) pp. 237-247. SSSA, Madison, WI. <https://doi.org/10.2134/1994.sewagesludge.c32>
- Real Decreto 637/2021, de 27 de julio, por el que se establecen las normas básicas de ordenación de las granjas avícolas. Boletín Oficial del Estado, núm. 179, de 28 de julio de 2021, pp. 90724-90759.
- Rees H.W., Chow T.L., Zebarth B.J., Xing Z., Toner P., Lavoie J., Daigle J.L. (2011). Effects of supplemental poultry manure applications on soil erosion and runoff water quality from a loam soil under potato production in northwestern New Brunswick. *Canadian Journal of Soil Science* 91: 595-613. <https://doi.org/10.4141/cjss10093>.

- Peñaloza J., Reyes A., González A., Pérez D., San-german D. (2019). Fertilización orgánica con tres niveles de gallinaza en cuatro cultivares de papa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10(5): 1139-1149. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i5.1759>.
- Romero Lima M.R., Trinidad Santos A., García E.R., Ferrera C.R. (2000). Producción de papa y biomasa microbiana en suelo con abonos orgánicos y minerales. *Agrociencia* 34(3): 261-269.
- Schmieder F., Bergström L., Riddle M., Gustafsson J.P., Klysibun W., Zehetner F., Condron L., Kirchmann H. (2018). Especiación de fósforo en un Perfil de suelo modificado con estiércol a largo plazo: evidencia de extracción química húmeda, espectroscopía ^{31}P -NMR y P K-edge XANES. *Geoderma* 322: 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.01.026>.
- Sharma D., Kushwah S., Nema P., Rathore S. (2011). Effect of sulphur on yield and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.). *International Journal of Agricultural Research* 6: 143-148. <https://doi.org/10.3923/ijar.2011.143.148>.
- Sharpley A.N., Rekolainen S. (1997). Phosphorus in agriculture and its environmental implications. En: Phosphorus loss from soil to water. Proceedings of a workshop, Wexford, Irish Republic, 29-31 Septiembre 1995, (Eds. Tunney H., Carton P., Brookes P.C., Johnston A.E.), pp. 1-53. Cab International.
- Sharpley A., Moyer B. (2000). Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall. *Journal of Environmental Quality* 29(5): 1462-1469. <https://doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900050012x>.
- Withers P.J.A., Clay S.D., Breeze V.G. (2001). Phosphorus transfer in runoff following application of fertilizer, manure, and sewage sludge. *Journal of Environmental Quality* 30(1): 180-188. <https://doi.org/10.2134/jeq2001.301180x>.
- Withers P.J.A., Hodgkinson R.A., Rollett A., Dyer C., Dils C., Collins A.L., Bilsborrow P.E., Bailey G., Sylvester-Bradley R. (2017) Reducing soil phosphorus fertility brings potential long-term environmental gains: a UK analysis. *Environmental Research Letters* 12: 063001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa69fc>.
- Zarabi M., Jalali M. (2012). Leaching of nitrogen and base cations from calcareous soil amended with organic residues. *Environmental Technology* 33: 1577-1588. <https://doi.org/10.1080/09593330.2011.638675>.
- Ziegler D., Heduit M. (1991). Engrais de ferme: valeur fertilisante, gestion, environnement. Institut Technique du Porc. (ITP), Institut Technique de Céréales et des Fourrages. (ITCF), Institut Technique de l'élevage bovin. (ITEB), Paris, France, 35 pp.

(Aceptado para publicación el 28 de junio de 2024)

La biofortificación con nanopartículas de óxido de zinc vía foliar aumenta la acumulación de biomasa y calidad fitoquímica de la lechuga

Manuel Fortis-Hernández¹, Alberto Sánchez-Estrada^{2*}, Deniss Hernández-Cruz¹, Erika Lagunes-Fortiz³, Rebeca Betancourt-Galindo⁴ y Judith Fortiz-Hernández²

¹ División de Estudios de Postgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México. Campus Instituto Tecnológico de Torreón, Carretera Torreón, San Pedro km 7,5; Ejido Ana. 27170 Torreón, Coahuila, México.

² Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Vegetal. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD, A.C.), Gustavo Enrique Astiazarán Rosas No. 46. 83304 Hermosillo, Sonora, México.

³ Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco km 38,5. 56230 Chapingo, Texcoco, Edo de México, México.

⁴ Centro de Investigación en Química Aplicada. Enrique Reyna H. 140. 25294 San José de los Cerritos, Saltillo, Coahuila, México.

Resumen

La prevalencia de la deficiencia de zinc en el mundo es un problema de salud pública, principalmente en países en desarrollo, la biofortificación de cultivos mediante nanopartículas de zinc podría ser un método eficaz para reducir las deficiencias nutricionales en la población deficitaria, además de incrementar el rendimiento, mejora la calidad fitoquímica y comercial de los cultivos. En este sentido, el objetivo de este trabajo fue evaluar la aplicación foliar de nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO) sobre la concentración de Zn, compuestos fitoquímicos y acumulación de biomasa en lechugas producidas hidropónicamente. Se evaluaron seis tratamientos (0; 1,5; 3,0; 3,5; 4,5; 6,0 y 7,5 mg L⁻¹ NPsZnO) con cinco repeticiones y tres aplicaciones bajo un diseño experimental completamente al azar. Se midieron variables morfológicas y acumulación de biomasa de las plantas (altura de la planta, diámetro de la corona, peso fresco y seco de raíces y hojas, volumen y longitud de raíces), así como variables de calidad fitoquímica como fenoles, flavonoides, capacidad antioxidante, vitamina C, clorofila, carotenoides y contenido de zinc foliar. Los valores de las variables morfológicas, acumulación de biomasa y concentración de zinc aumentaron proporcionalmente con el incremento de la concentración aplicada de NPsZnO. Este incremento se reflejó en un mayor tamaño, peso y calidad de las lechugas tratadas en comparación con las no tratadas. También se observó que a mayor concentración de NPsZnO aplicada mayor aumento de la capacidad antioxidante y la vitamina C.

Palabras clave: *Lactuca sativa* L., biomasa fresca y seca, compuestos fenólicos, flavonoides, carotenoides, clorofila.

* Autor para correspondencia: aestrada@ciad.mx

Cita del artículo: Fortis-Hernández M., Sánchez-Estrada A., Hernández-Cruz D., Lagunes-Fortiz E., Betancourt-Galindo R., Fortiz-Hernández J. (2024). La biofortificación con nanopartículas de óxido de zinc vía foliar aumenta la acumulación de biomasa y calidad fitoquímica de la lechuga. ITEA-Información Técnica Económica Agraria 120(4): 344-359. <https://doi.org/10.12706/itea.2024.009>



Copyright: © 2024 de los autores. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY NC SA 4.0)

Biofortification with zinc oxide nanoparticles via foliar increases biomass accumulation and lettuce phytochemical quality

Abstract

The prevalence of zinc deficiency in the world is a public health problem, mainly in developing countries; the biofortification of crops using zinc nanoparticles could be an effective method to reduce nutritional deficiencies in the deficient population, in addition to increasing yield, improving the phytochemical and commercial quality of crops. In this sense, this work aimed to evaluate the foliar application of zinc oxide nanoparticles (ZnONPs) on the concentration of Zn, phytochemical compounds, and biomass accumulation in hydroponically produced lettuce. Six treatments (0, 1.5, 3.0, 3.5, 4.5, 6.0, and 7.5 mg L⁻¹ ZnONPs) were evaluated with five repetitions and three applications under a completely randomized experimental design. Morphometric variables and plant biomass accumulation were measured (plant height, crown diameter, fresh and dry weight of roots and leaves, root volume and length), as well as phytochemical quality variables such as phenols, flavonoids, capacity antioxidant, vitamin C, chlorophyll, carotenoids, and leaf zinc content. The dimensions of the morphometric variables, biomass accumulation, and zinc concentration increased proportionally with the increase in the concentration of ZnONPs applied. This increase was reflected in the greater size, weight, and quality of the treated lettuces compared to the untreated ones. It was also observed that a higher concentration of ZnONPs applied greater the increase in antioxidant capacity and vitamin C.

Keywords: *Lactuca sativa* L., fresh and dry biomass, phenolics compounds, flavonoids, carotenoids, chlorophyll.

Introducción

El zinc (Zn) es un micronutriente necesario porque participa en una serie de procesos metabólicos durante el desarrollo de las plantas. El Zn es un nutrimento esencial en la síntesis de triptófano (Brown *et al.*, 1993; Alloway, 2008), precursor de la biosíntesis de auxinas (Tsonev y Cebola-Lidon, 2012) y como cofactor en la estructura y función de numerosas proteínas (Broadley *et al.*, 2007).

La enmienda con Zn directamente al suelo o impregnación de semillas son métodos de aplicación comúnmente usados, sin embargo, este elemento se inmoviliza fácilmente en el suelo tornándolo mayoritariamente insoluble y no fitodisponible (Broadley *et al.*, 2007). Por lo tanto, los fertilizantes tradicionales se desperdician y contribuyen a la contaminación. Esto nos obliga a explorar enfoques novedosos para garantizar la aplicación adecuada de fertilizantes en la dosis, momento correcto, y de manera disponible, sin causar problemas ambientales (Mathpal *et al.*, 2015).

Tradicionalmente la nutrición vegetal se ha complementado a través de la fertilización foliar (Fernández y Eichert, 2009; Bindraban *et al.*, 2015), e implica absorción, penetración tanto estomática como cuticular además de la difusión dentro de la hoja; finalmente, los nutrientes se translocan a los órganos diana para realizar su función (Fernández *et al.*, 2015). La fertilización foliar puede aumentar la absorción de nutrientes de forma más rápida y eficiente, minimizando el impacto ambiental con el potencial beneficio en la salud del consumidor (Otálora *et al.*, 2018). La fertilización foliar es la forma más eficaz de aumentar las concentraciones de Zn en los tejidos vegetales (White y Broadley, 2011).

Sin embargo, la fertilización foliar tiene el desafío de atravesar la cutícula y los estomas, posteriormente es transportada vía apoplasto a los órganos diana, pero debido al tamaño de las partículas y la inmovilización provoca la formación de compuestos insolubles de algunos micronutrientes (Niu *et al.*, 2021). Actualmente, el uso de nanopartículas en la

producción agrícola como los nanofertilizantes foliares (Subramanian et al., 2015) son una opción viable que proporciona beneficios directos de manera controlada, reduce el riesgo de fitotoxicidad (Mahapatra et al., 2022) y además toma ventaja sobre los fertilizantes foliares convencionales debido al tamaño de los solutos que superan el diámetro de los poros de los estomas, dificultando la absorción y movimiento de los micronutrientes (Kardos et al., 2015), y su aplicación en la agricultura tiene el potencial de lograr un equilibrio y alimentos altamente nutritivos (Zia-Butt y Naseer, 2020).

Desde un punto de vista nutricional, el Zn tiene un papel muy importante en la salud humana. En este sentido la falta de Zn puede provocar un deterioro del sistema inmunológico, menor crecimiento de los niños y problemas de fertilidad (Levenson y Morris, 2011). Actualmente, la deficiencia de Zn es un problema global, especialmente en los países emergentes (Maxfield, 2022). Por este motivo, la suplementación con zinc podría ayudar a combatir tales deficiencias (Gać et al., 2021). El uso de nanopartículas (NP) híbridas orgánico-metálicas para mejorar el contenido de Zn en las plantas (Bouis y Saltzman, 2017) conocido como biofortificación podría ser una alternativa para minimizar el déficit de Zn en la población vulnerable.

La biofortificación de los cultivos utilizando nanopartículas (NP) proporciona una opción económica para abordar los problemas de deficiencia de micronutrientes (Younas et al., 2023), a corto plazo puede mejorar la composición mineral de los alimentos (Bouis, 2007), especialmente hortalizas de hoja verde como la lechuga, cuya susceptibilidad a la biofortificación se ha demostrado con resultados positivos, con el extra de mejorar la calidad fitoquímica al estimular la biosíntesis de compuestos que conforman el sistema antioxidante de los vegetales (Fortis-Hernández et al., 2022).

Debido a lo anterior, este trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto sobre la acumulación de biomasa, incremento en la concentración de fitoquímicos y cuantificar la concentración de Zn en hojas de lechuga tratadas con NPsZnO como biofortificante y producidas bajo un sistema hidropónico.

Material y métodos

Lugar del experimento, material vegetal y tratamientos

El experimento se llevó a cabo durante la estación otoño-invierno dentro de una estructura tipo invernadero provisto de una malla antiáfidos de color blanco con una altura de 2,50 m ubicada en el municipio de Torreón, Coahuila, México entre las coordenadas 25° 36' 37" LN y 103° 22' 33" LW y 1150 m s.n.m. Las condiciones internas de humedad relativa y temperatura interna fueron del 70 % y 22 °C, respectivamente. En un sistema hidropónico provisto de una tubería de PVC (Policloruro de Vinilo) de 3 pulgadas de diámetro colocada en pendiente del 10 % y separaciones entre orificios de 20 cm se colocaron plántulas de lechuga.

Semillas de lechuga "romana" (*Lactuca sativa* L.) tipo hoja verde (Verde Vita®) de ciclo medio (80 a 90 días) se sembraron en foami agrícola (espuma fenólica). Cuando las plántulas presentaron de 6 a 7 hojas verdaderas se trasplantaron, colocando una planta en cada cavidad de los tubos de PVC. Las necesidades nutricionales de las lechugas se cubrieron con la solución nutritiva de Steiner (1961), adaptando las cantidades a los requerimientos según el estado fenológico, con un pH que oscilaba entre 5,5-6 y una conductividad eléctrica de 1,5-2,0 dS m⁻¹. Brevemente, la solución de Steiner modificada se preparó con la siguiente formulación: I) cationes (mmol L⁻¹): Ca²⁺ (1,49); Mg²⁺ (106); K⁺ (11,55). II) cationes (g L⁻¹) Fe (0,005); Mn (0,0025); Zn (0,0005); B

(0,0005); Cu (0,0025); Mg (0,003) y Mo (0,0005); y III) aniones (mmol L⁻¹): NO₃⁻ (11,95); H₂PO₄²⁻ (1,02); SO₄²⁻ (1,2).

Las NPsZnO se produjeron según la metodología modificada de Ramírez-Barrón *et al.* (2019). Brevemente, se calentó una solución de acetato de zinc (CH₃CO₂)₂Zn disuelto en etanol hasta 80 °C durante 3 h en un reactor. Posteriormente se vertió una solución de NaOH y se mantuvo en agitación durante 1 h para precipitar las nanopartículas. El material decantado se lavó con agua destilada varias veces para determinar el tamaño de partícula

y caracterizaron mediante microscopía electrónica de transmisión (MET). El tamaño de las NPsZnO osciló entre 20 y 60 nm, con una pureza del 97 %, un color blanco y una forma estructural hemisférica y poligonal.

Las NPsZnO se mezclaron con surfactante no iónico INEX-A, considerando los seis tratamientos y cinco réplicas (Tabla 1). Las NPsZnO se aplicaron inicialmente 15 días después del trasplante y posteriormente cada 15 días durante la mañana, con un pulverizador equipado con una boquilla con un chorro de 0,14 mL por inyección.

Tabla 1. Concentración de NPsZnO aplicada en lechugas producidas bajo un sistema hidropónico.
Table 1. Concentration of NPsZnO applied to lettuce produced under a hydroponic system.

Tratamientos	NPsZnO (mg L ⁻¹)	Número de aplicaciones	Concentración acumulada (mg L ⁻¹)
T0 (Testigo)	H ₂ O	3	0,0
T1	1,5	3	4,5
T2	3,0	3	9,0
T3	4,5	3	13,5
T4	6,0	3	18,0
T5	7,5	3	22,5

Para las determinaciones de las variables se cosecharon cinco plantas por tratamiento a las que se le midió la altura de planta (AP), diámetro de corona (DC), volumen (VR) y longitud de raíces (LR), además de la acumulación de biomasa vegetal por medio del peso fresco (PFC) y seco de cabeza (PSC), peso fresco (PFR) y seco de la raíz (PSR); dentro de los parámetros fisiológicos se analizaron el índice de cosecha (IC), coeficiente alometría (raíz-brote) (CA), clorofila total, a y b (CIT, Cla y Clb) y carotenoides totales (CarT); mientras que la calidad fitoquímica se evaluó por me-

dio de la acumulación de compuestos fenólicos y flavonoides totales, zinc, vitamina C y capacidad antioxidante en el tejido vegetal.

Morfometría vegetal: Altura de planta (AP), diámetro de corona (DC), volumen de raíces (VR) y longitud (LR)

En lechugas cosechadas, se tomaron muestras de las hojas más internas para medir la AP. La lectura se tomó desde el cuello de la raíz hasta el ápice de la hoja, con una regla (Maped Colleged®, México) graduada en

centímetros (cm). Se utilizó una cinta métrica adaptada para medir el DC (cm) en cada una de las réplicas evaluadas.

En el momento de la cosecha, las raíces se cortaron y se midieron desde el cuello de la raíz hasta la cofia con una cinta métrica graduada (cm). El VR se evaluó por el método del desplazamiento (mL).

Acumulación de biomasa vegetal y parámetros fisiológicos: Peso fresco de cabeza (PFC) y seco (PSC), peso fresco de raíz (PFR) y peso seco (PSR), índice de cosecha (IC) y coeficiente alométrico raíz-brote (CA)

En lechuga cosechadas, el peso fresco (PFC) y el peso seco (PSC) de la cabeza, el peso fresco (PFR) y el peso seco de la raíz (PSR) se midieron en una balanza digital (Truper base-5EP modelo 3V cc). Luego de determinar el peso fresco, las hojas y raíces se secaron en estufa (Memmert Maca modelo W02WVU), durante 24 h a 75 °C. El índice de cosecha (IC) se determinó con la ecuación (Abdel-Aziz et al., 2016):

$$IC = \frac{PSC + PSR}{PSC \times 100} \quad [1]$$

Mientras que el coeficiente de alometría raíz-brote (CA) se calculó mediante la ecuación (Poorter et al., 2012):

$$CA = \frac{PSR}{PSC} \quad [2]$$

Fitoquímicos: Contenido total de clorofila (CIT), clorofila a (Cla) y clorofila b (Clb)

El contenido de clorofila se analizó según el método modificado de Liu et al. (2013). Brevemente, se homogeneizaron 0,5 g de tejido fresco de las hojas más internas en 10 mL de etanol frío al 95 % (J.T. Baker). El homogeni-

zado se centrifugó (Thermo Scientific SR 8) a 1500g durante 20 min. Posteriormente, al sobrenadante se le midió la absorbancia con un espectrómetro (Hach 6500, Alemania) a 665 (A665) y 649 (A649) nm. El contenido de clorofila se calculó usando la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} Cla &= (1395A)_{665} - (6,88A)_{649} \\ Clb &= (24,95A)_{649} - (7,32A)_{665} \\ CIT &= Cla + Clb \end{aligned} \quad [3]$$

Contenido de Cl (mg g⁻¹ pf) =

$$= \frac{CIT \text{ (mL)} \times (\text{factor de dilución})}{\text{peso fresco (g)}} \quad [4]$$

Contenido total de carotenoides (Tcar)

Los carotenoides totales se determinaron mediante el método modificado de De Carvalho et al. (2012). Brevemente, en 25 mL de acetona fría se molieron 15 g de muestra fresca hasta obtener una pasta homogénea, posteriormente se filtró y se le añadió 40 mL de éter de petróleo (J.T. Baker). En un embudo de separación se descartó la fase acuosa, mientras que 50 mL de la fase orgánica se pasó a través de 15 g de sulfato de sodio anhidro (Sigma Aldrich) en un embudo con papel filtro (Whatman No 4). El residuo obtenido se leyó en un espectrofotómetro (Hach 6500, Alemania) a una longitud de onda 450 nm. El contenido de Tcar se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$Tcar \text{ (}\mu\text{g g}^{-1}\text{ pf)} = \frac{(A \times V \text{ (mL)}) \times 104}{CE \times P \text{ (g)}} \quad [5]$$

Donde A = Absorbancia; V = Volumen total de extracto; P = peso fresco de la muestra; CE 1 cm (1 %) = 2592 (coeficiente de extinción del β-caroteno en éter de petróleo).

Concentración de zinc en tejido vegetal

Se utilizó la técnica de McKean (1993) con ligeras modificaciones. Para la determinación del contenido de zinc en hojas internas de lechuga muestreadas se trituraron 3 g de muestra de tejido vegetal seco (se incluyeron dos blancos y una muestra de referencia). Los crisoles con la muestra se colocaron en una mufla a 600 °C durante 4 h y luego se enfriaron a temperatura ambiente. Las cenizas enfriadas se mezclaron y digirieron con 10 mL de HCL (J.T. Baker). Posteriormente, las cenizas digeridas se filtraron a través de papel de filtro (Whatman No. 4). Las cenizas fueron lavadas y la concentración de zinc se determinó mediante absorción atómica en un equipo GBC XplorAA. Se realizó una curva estándar preparada con ZnO. Los resultados se expresaron en $\mu\text{g ZnO g}^{-1}$ pf.

Extracción de compuestos, contenido de compuestos fenólicos totales, contenido de flavonoides totales

Para obtener los extractos, se molieron 1,5 g de muestras frescas con 10 mL de etanol acuoso al 80 % (v/v) y se agitaron (agitador rotatorio, ATR Inc., EE. UU.) durante 24 h a 20 rpm a 5 °C. Los extractos se centrifugaron a 3000 rpm durante 5 min y se tomó 1 mL de cada sobrenadante para desarrollar la reacción colorimétrica.

Los compuestos fenólicos se determinaron utilizando el método de Folin-Ciocalteu modificado (Singleton y Rossi, 1965). Una mezcla de 1,5 mL de reactivo de Folin-Ciocalteu (Sigma-Aldrich, St Louis MO, USA) diluido (1:1), 270 μL de agua destilada y 30 μL del ex-

tracto se dejó reaccionar durante 5 min en oscuridad a temperatura ambiente. Posteriormente se detuvo la reacción con 1,2 mL de Na_2CO_3 (7,5 % p/v). La absorbancia de la disolución fue medida a una longitud de onda de 765 nm en un espectrofotómetro UV (Genesys 10). Los resultados se registraron en mg de ácido gálico 100 g^{-1} PF utilizando una curva de calibración (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, EE. UU.).

Se utilizó la técnica de Lamaison y Carnet (1990) con ligeras modificaciones para determinar el contenido total de flavonoides. Brevemente, en un pool de disoluciones se mezclaron 250 μL de extracto etanólico; 1,25 mL de agua destilada y 75 μL de NaNO_2 al 5 %. Después de 5 min, se vertieron 150 μL de $\text{AlCl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (10 %). Después de 10 min, se detuvo la reacción agregando 500 μL de NaOH 1 M y 2,75 mL de agua destilada. La absorbancia se midió en un espectrofotómetro UV (Genesys 10) a 510 nm de longitud de onda. Se realizó una curva estándar preparada con quercetina. Los resultados se expresaron en mg de quercetina por 100 g^{-1} PF.

Contenido de vitamina C

El contenido de vitamina C en las hojas internas de lechuga se determinó mediante el método de titulación (Padayatty et al., 2003). Se trituraron muestras frescas de 10 g con 10 mL de ácido clorhídrico al 2 %. Después de eso, las muestras se filtraron y se dividieron en alícuotas con 100 mL de agua destilada. Se tituló una alícuota de 10 mL con 2,6-dicloro-fenolindofenol 0.001 mN (Sigma-Aldrich, St. Louis, Missouri, EE. UU.) y se calculó el contenido de vitamina C con la fórmula:

$$\text{Vit. C (mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ PF)} = \frac{(\text{mL de 2,6 - Dicloroindofenol sódico})(0,088)(\text{volumen total})(100)}{(\text{volumen alícuota})(\text{peso fresco de la muestra})} \quad [6]$$

Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante se evaluó con el método de Brand-Williams *et al.* (1995) con ligeras modificaciones. Se preparó una disolución de DPPH⁺ (Aldrich, St. Louis, MO, EE. UU.) y se ajustó a una longitud de onda de 515 nm.

Durante 30 min una disolución con 50 µL de extracto y 1950 µL de disolución de DPPH se dejó reaccionar. La absorbancia de la mezcla se midió a 517 nm con un espectrofotómetro UV (Genesys 10). Los resultados se reportaron como capacidad antioxidante equivalente en µM equivalente de Trolox 100 g⁻¹ de peso fresco calculado a partir de la curva estándar de trolox (Aldrich, St. Louis, Missouri, EE. UU.).

Análisis estadístico

El análisis de varianza (ANOVA) de los datos se analizó bajo un diseño completamente al azar con seis tratamientos y cinco repeticiones y las medias se compararon mediante el método DMS ($p \leq 0,05$) y se analizaron con el software estadístico SAS versión 9.3 (2009).

Resultados y discusión

El Zn es un elemento que desempeña diferentes funciones en el metabolismo de las plantas a través de diversos mecanismos. Por tanto, la fertilización con Zn, utilizando principalmente NPsZnO, provoca efectos benéficos en diferentes especies de plantas, lo cual está bien documentado (Sharifan *et al.*, 2019; Fortis-Hernández *et al.*, 2022; Szerement *et al.*, 2022). En el presente trabajo se verificaron los beneficios de las NPsZnO sobre diferentes variables morfométricas y de acumulación de biomasa de las lechugas producidas bajo un sistema hidropónico, debido al aumento de tamaño, rendimiento de biomasa de la cabeza y la raíz de lechuga. Los beneficios también se extienden al incremento de compuestos fitoquímicos.

Morfometría vegetal: Altura de planta (AP), diámetro de corona (DC), volumen (VR) y longitud de raíces (LR)

La Tabla 2 muestra las comparaciones de medias de AP, DC, VR y LR. Las aplicaciones de NPsZnO a diferentes niveles mostraron dife-

Tabla 2. Medias y desviación estándar de las variables morfométricas de lechugas tratadas con NPsZnO producidas bajo un sistema hidropónico.
Table 2. Means and standard deviation on the morphometric variables of lettuces treated with ZnONPs produced under a hydroponic system.

Tratamientos NPsZnO	Altura de planta (AP)	Diámetro de la corona (DC)	Volumen de raíz (VR)	Longitud de raíz (LR)
(mg L ⁻¹)	(cm)	(cm)	(cm ³)	(cm)
T0	20,70 ± 0,83ab ¹	22,21 ± 1,86c	154,00 ± 37,81b	46,80 ± 5,84ab
T1	21,86 ± 1,32ab	31,89 ± 4,71ab	176,03 ± 50,29ab	53,80 ± 11,17a
T2	19,84 ± 1,01b	26,15 ± 5,71bc	164,02 ± 37,81ab	36,00 ± 7,24b
T3	22,70 ± 1,62ab	31,44 ± 4,53ab	190,00 ± 41,23ab	48,00 ± 2,34ab
T4	23,56 ± 1,71a	31,95 ± 2,62ab	206,00 ± 19,49a	46,00 ± 6,55ab
T5	22,70 ± 2,70ab	29,79 ± 5,01ab	170,00 ± 41,24ab	46,00 ± 6,81ab

¹Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, $p \leq 0,05$).

rencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en cada variable de la morfometría de la planta. Los tratamientos con NPsZnO reportaron los valores más altos en DC y VR, mientras que en AP y LR solo T2 fue inferior a T0. LR mostró un comportamiento irregular con una diferencia del 13,02 % entre los valores más altos (T1) y los más bajos (T0, T4 y T5). En cambio, T4 mostró un 15 % en AP y 30 % en VR y DC mayor que T0.

Acumulación de biomasa vegetal y variables fisiológicas: Peso fresco (PFC) y peso seco de la cabeza (PSC), peso fresco (PFR) y peso seco de la raíz (PSR), índice de cosecha (IC) y coeficiente alométrico raíz-brote (CA)

Los resultados fueron estadísticamente diferentes ($p < 0,05$), los tratamientos con NPsZnO tuvieron valores superiores a T0 en cada una de las variables, específicamente en los tratamientos con mayores concentraciones de NPsZnO. En la variable PFC la diferencia fue más evidente porque T3 y T4 superaron a T0 en más del 100 %. El tratamiento T4 resultó en los valores más altos de PFC y PSC de 885 y 43,43 g, respectivamente. Mientras que el T3 presentó pesos de 192,88 g de PFR y 13,23 g de PSR. El mayor valor de CA lo obtuvo T0 con 0,39 %, mientras que los tratamientos con NPsZnO fluctuaron entre 0,29 % y 0,33 %; por el contrario, el valor de IC para T0 fue el más bajo con 72 % y los tratamientos con NPsZnO oscilaron entre 75 y 77 % (Tabla 3).

Los resultados demostraron que los valores de AP y DC superaron a los del mercado estándar (Pereira et al., 2023), mientras que los valores de VR y LR coincidieron con los reportados por Cometti et al. (2013) que aplicaron diferentes soluciones nutritivas enriquecidas con Zn.

En este sentido, los resultados de morfometría y acumulación de biomasa vegetal concuerdan con los trabajos en los que se ha su-

Tabla 3. Medias y desviación estándar de acumulación de biomasa de lechugas tratadas con NPsZnO producidas bajo un sistema hidropónico.

Table 3. Means and standard deviation on the accumulation of lettuce biomass treated with ZnONPs produced under a hydroponic system.

Tratamientos NPsZnO (mg L ⁻¹)	Peso fresco de la cabeza (PFC) (g)	Peso seco de la cabeza (PSC) (g)	Peso fresco de la raíz (PFR) (g)	Peso seco de la raíz (PSR) (g)	CA ²	IC ³ (%)
T0	365,8 ± 63,8c ¹	22,14 ± 4,5b	121,52 ± 11,4b	8,62 ± 1,5a	0,39	72
T1	662,4 ± 197,9ab	37,65 ± 19,9ab	164,70 ± 36,5ab	11,25 ± 2,5a	0,29	77
T2	563,4 ± 278,5bc	31,37 ± 14,6ab	142,36 ± 35,8ab	9,18 ± 2,6a	0,29	77
T3	781,1 ± 158,3ab	41,57 ± 11,7ab	192,88 ± 30,4ab	13,23 ± 3,9a	0,32	76
T4	885,0 ± 78,4a	43,43 ± 9,6a	188,88 ± 30,3a	12,72 ± 3,6a	0,29	77
T5	669,0 ± 201,0ab	33,65 ± 3,1ab	156,00 ± 39,2ab	11,37 ± 4,2a	0,33	75

¹Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, $p \leq 0,05$). ²Coeficiente de alometría. ³Índice de cosecha.

plementado Zn en diferentes niveles, formas y momentos tanto en lechuga (Liu et al., 2016; Fortis-Hernández et al., 2022), como en frijol mungo y garbanzo (Mahajan et al., 2011), arroz (Lal Regar et al., 2022) y maíz (Subbaiah et al., 2016), con la ventaja de menores concentraciones de Zn en forma de NPsZnO y mayor eficiencia en la asimilación y transporte (Shukla et al., 2016) sin riesgo fitotóxico (Reddy et al., 2016).

Lo anterior podría llevar a la participación del Zn, así como un precursor de la síntesis de aminoácidos (triptófano) y jugar un papel indirecto en la síntesis de auxinas (Mustafa et al., 2018), fitohormona que estimula la división y elongación celular, al igual que en la fotosíntesis en fase enzimática y en el metabolismo de carbohidratos (Ahmed et al., 2021), además de la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos requerida por el tejido meristemático (Gondal et al., 2021), así como el mantenimiento de la integridad de las membranas celulares (Khalid et al., 2019), que en su conjunto participa en el desencadenamiento del crecimiento mediante la acumulación de biomasa. La estimulación de NPsZnO sobre la acumulación de biomasa tuvo un efecto tóxico, pero no exclusivo ya que las raíces también se beneficiaron, aunque en menor medida. El IC de las lechugas tratadas con NPsZnO fue entre un 2 y un 5 % mayor que el tratamiento control (Tabla 2), un beneficio demostrado por Haider et al. (2020) en frijol mungo y en maíz (Wasaya et al., 2017) cuando se aplicó Zn vía foliar en dosis de 1 y 5 %, respectivamente. Asimismo, el valor CA de T0 fue menor de 0,06 a 0,1 % respecto a los tratamientos. Moshfeghi et al. (2019) también reportaron que la cebada biofortificada con NPsZnO con y sin micorrizas disminuyó el CA debido al mayor efecto del Zn en la parte aérea que en las raíces.

Fitoquímicos: Clorofila total (CIT), clorofila a (Cla) y b (Clb), Contenido total de carotenoides (CarT) y concentración de zinc en tejido vegetal

La concentración de ZnONP aplicada influyó en los contenidos de clorofila y caroteno en las plantas de lechuga (Tabla 4). Hubo diferencia significativa ($p < 0,05$) entre tratamientos en relación con el contenido de CIT, Cla, Clb, CarT y Zinc (Tabla 4).

Los contenidos de Cla y Clb mostraron un comportamiento inusual, debido a que hubo mayor contenido de Clb que de Cla (Tabla 4). El rango de CIT encontrado en este estudio estuvo entre 3,09 mg g⁻¹ PF para T0 y 4,02 mg g⁻¹ PF para T5. CarT osciló entre 1,52 y 1,96 mg g⁻¹ PF para los tratamientos con T0 y NPsZnO, respectivamente. Las proporciones Cla/Clb y CIT/CarT oscilaron entre 0,55 a 0,66 y 2,0 a 2,07, respectivamente sin una tendencia clara en términos de la concentración de NPsZnO aplicada (Tabla 4).

Las NPsZnO afectaron positivamente el contenido de Zn y se detectaron diferencias significativas ($p < 0,05$) (Tabla 4). La mayor concentración de Zn se detectó en las muestras tratadas, que fluctuaron entre 0,76 (T1) y 5 % (T5) más contenido que T0.

El efecto de la aplicación de NPsZnO sobre los contenidos de CIT, Cla y Clb depende de la concentración, el tamaño y la fuente de la nanopartícula (Juárez-Maldonado et al., 2019; Rivero-Montejo et al., 2021). Resultados de investigaciones previas muestran una discrepancia respecto al efecto de las NPsZnO sobre el contenido de clorofilas en las plantas. Así, mientras que algunos investigadores encontraron que las NPsZnO estimulan la biosíntesis de clorofilas (Wang et al., 2016; Garza-Alonso et al., 2023), otros informan de que las NPsZnO inhiben su biosíntesis (Husayn y Guda, 2023).

Tabla 4. Medias y desviación estándar del contenido de clorofila total, a, b, carotenoides y Zn en lechugas tratadas con NPsZnO y producidas bajo en lechugas cultivadas bajo un sistema hidropónico
Table 4. Means and standard deviation on the content of total chlorophyll, a, b, carotenoids, and Zn in lettuce treated with ZnONPs and produced under lettuce grown under a hydroponic system.

Tratamientos NPsZnO (mg L ⁻¹)	CIT (mg g ⁻¹ PF)	Cla (mg g ⁻¹ PF)	Clb (mg g ⁻¹ PF)	Cla/Clb	CarT (μg g ⁻¹ PF)	CIT/CarT	Contenido de Zn (μg g ⁻¹ PF)
T0	3,06 ± 0,04f ¹	1,09 ± 0,05e	1,97 ± 0,05e	0,55	1,52 ± 0,04f	2,01	9,05 ± 0,02f
T1	3,41 ± 0,01e	1,26 ± 0,04d	2,15 ± 0,02d	0,59	1,64 ± 0,01e	2,07	9,12 ± 0,02e
T2	3,58 ± 0,01d	1,36 ± 0,01c	2,22 ± 0,02c	0,61	1,77 ± 0,01d	2,02	9,19 ± 0,04d
T3	3,68 ± 0,02c	1,42 ± 0,01bc	2,26 ± 0,02c	0,63	1,84 ± 0,02c	2,00	9,27 ± 0,01c
T4	3,78 ± 0,01b	1,45 ± 0,01b	2,33 ± 0,02b	0,62	1,88 ± 0,01b	2,01	9,35 ± 0,04b
T5	4,02 ± 0,01a	1,60 ± 0,04a	2,42 ± 0,01a	0,66	1,96 ± 0,01a	2,05	9,55 ± 0,11a

¹Medias con diferente literal en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, $p \leq 0,05$). CIT= Clorofila total. Cla = Contenido de clorofila a. Clb = Contenido de clorofila b. CarT = Carotenoides total.

Los hallazgos del estudio actual mostraron que las NPsZnO afectaron significativamente los contenidos de CIT y CarT de las hojas de lechuga “romana”. En el mismo sentido, Sohail et al. (2022) informaron un aparente impacto de las NPsZnO en el contenido de clorofila tanto en “Faisal” como en “Shiralee” *B. napus* en dosis bajas (5, 10 y 15 mg L⁻¹), donde el Zn podría ser un cofactor en la formación de cloroplastos (Nouet et al., 2011).

Aunque no es común que el contenido de Clb sea mayor que el de Cla, se ha informado que en la lechuga podría ocurrir debido a la sombra de las hojas mismas y de la estructura con malla antiáfidos en donde se realizó el experimento (Sapkota et al., 2019; Fortis-Hernández et al., 2022). Por otro lado, los tratamientos con NPsZnO a bajas concentraciones aumentaron el contenido de carotenoides de la misma manera como lo demostraron Sohail et al. (2022) en variedades de *B. napus*. Este aumento podría deberse a un efecto tóxico de provocación que activa el sistema antioxidante, mediante la elevación de la expresión de genes relacionados con la biosíntesis de carotenoides (Wang et al., 2016); por lo tanto, el aumento en la relación CIT/CarT observado es insignificante. En nuestros estudios, el contenido de Zn en hojas de T5, la concentración máxima de NPsZnO, fue solo un 5 % mayor que el control (T0) pero menor que lo informado por Salachna et al. (2021) en pimiento rojo (*Perilla frutescens*) tratado con 50 mg L⁻¹ NPsZnO, probablemente causado por una baja concentración del tratamiento y metabolizado por la planta. Estudios recientes demuestran la capacidad de las NPsZnO para modificar el metabolismo primario y secundario (Mumivand et al., 2021). Existe mucha evidencia de la capacidad de las NPsZnO para desencadenar la producción de compuestos bioactivos, tomando el papel de elicitador en las células del parénquima de las hojas (Pathak et al., 2023).

Contenido de fenoles totales, flavonoides, vitamina C y capacidad antioxidante

El efecto de las aplicaciones de NPsZnO sobre el contenido foliar de diferentes fitoquímicos se muestra en la Figura 1. El análisis de varianza muestra diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos. T0 tuvo los valores más bajos en cada una de las variables fitoquímicas,

obteniendo valores de 159,10 mg GA 100 g⁻¹ PF; 106,9 mg QE 100 g⁻¹ PF; 9,1 mg vitamina C 100 g⁻¹ PF y 94 miliequivalentes de Trolox 100 g⁻¹ PF, respectivamente. Por el contrario, observamos un aumento lineal en el contenido de fitoquímicos con concentraciones crecientes de NPsZnO como se demostró en T4 y T5 (204 mg GA 100 g⁻¹ PF, 151 mg QE 100 g⁻¹ PF).

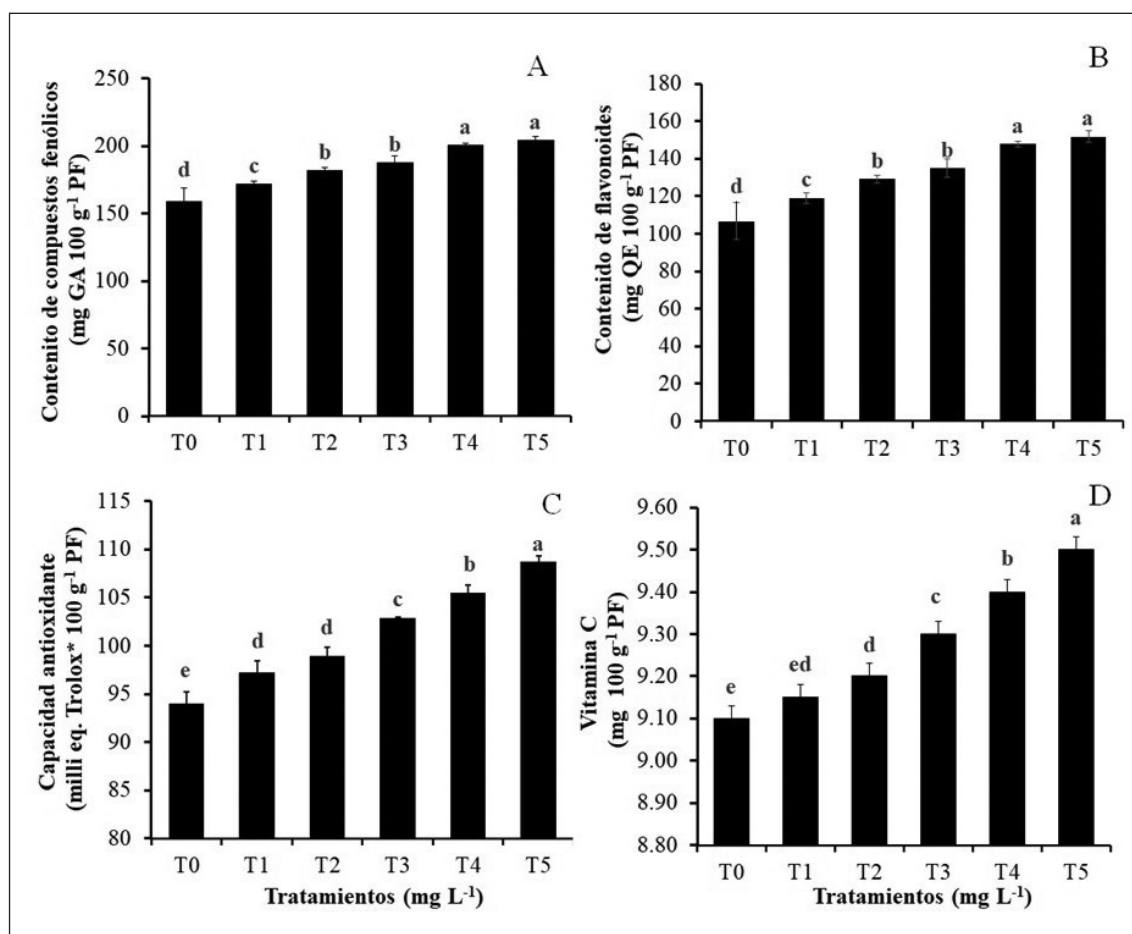


Figura 1. Medias y desviación estándar en el contenido de compuestos fenólicos totales (A), flavonoides (B), capacidad antioxidante (C) y contenido de vitamina C (D) en lechugas tratadas con NPsZnO y cultivadas bajo un sistema hidropónico.

Figure 1. Means and standard deviation on the content of total phenolic compounds (A), flavonoids (B), antioxidant capacity (C), and vitamin C content (D) in lettuces treated with ZnONPs and grown under a hydroponic system.

En el estudio actual, las NPsZnO aumentaron la cantidad total de compuestos fenólicos, flavonoides y vitamina C. Este resultado sugiere que las nanopartículas desencadenaron genes de defensa y la producción de especies reactivas de oxígeno que estimulan las respuestas antioxidantes y el metabolismo secundario (Javed et al., 2018; Ahmad et al., 2020; Rivera-Gutiérrez et al., 2021).

El Zn acumulado en hojas de lechuga tratadas pudo inducir una mayor capacidad antioxidante debido al aumento de compuestos fitoquímicos analizados y a una posible activación del mecanismo de defensa enzimático (CAT, catalasa; SOD, superóxido dismutasa; GSH-Px, glutatión peroxidasa) (Sida-Arreola et al., 2017).

Conclusiones

La aplicación de Zn en forma de NPsZnO vía foliar produjo diferencias significativas en el tamaño y acumulación de biomasa de las lechugas tratadas; además independientemente de la concentración aplicada se produjo un incremento en la concentración de los compuestos fitoquímicos, vitamina C y capacidad de antioxidante, así como la acumulación de Zn en el tejido foliar interno de las lechugas siendo más evidente en los tratamientos con mayor concentración de NPsZnO, provocando el efecto de biofortificación y mejora de la calidad nutricional.

Referencias bibliográficas

Abdel-Aziz H.M.M., Hasaneen M.N.A., Omer A.M. (2016). Nano chitosan-NPK fertilizer enhances the growth and productivity of wheat plants grown in sandy soil. *Spanish Journal of Agricultural Research* 14(1): e0902. <https://doi.org/10.5424/sjar/2016141-8205>

Ahmad M.A., Javed R., Adeel M., Rizwan M., Ao Q., Yang Y. (2020). Engineered ZnO and CuO nanoparticles ameliorate morphological and biochemical response in tissue culture regenerants of candyleaf (*Stevia rebaudiana*). *Molecules* 25(6): 1356. <https://doi.org/10.3390/molecules25061356>

Ahmed R., Yusoff Abd Samad M., Uddin M.K., Quddus M.A., Hossain M.A.M. (2021). Recent trends in the foliar spraying of zinc nutrient and zinc oxide nanoparticles in tomato production. *Agronomy* 11(10): 2074. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102074>

Alloway B.J. (2008). Zinc in soils and crop nutrition, 2nd Ed. International Zinc Association; Paris: International Fertilizer Industry Association. Brussels, Belgium and Paris, France. 135 pp.

Bindraban P.S., Dimkpa C., Nagarajan L., Roy A., Rabbinge R. (2015). Revisiting fertilizers and fertilization strategies for improved nutrient uptake by plants. *Biology and Fertility of Soils* 51(8): 897-911. <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1039-7>

Brand-Williams W., Cuvelier M.E., Berset C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food science and Technology* 28(1): 25-30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)

Bouis H.E. (2007). The potential of genetically modified food crops to improve human nutrition in developing countries. *Journal of Development Studies* 43(1): 79-96. <https://doi.org/10.1080/00220380601055585>

Bouis H.E., Saltzman A. (2017). Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. *Global Food Security* 12: 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.009>

Broadley M.R., White P.J., Hammond J.P., Zelko I., Lux A. (2007). Zinc in plants. *New phytologist* 173(4): 677-702. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x>

Brown P.H., Cakmak I., Zhang Q. (1993). Form and function of zinc plants. En: *Zinc in Soils and Plants: Proceedings of the International Symposium on 'Zinc in Soils and Plants' held at The*

- University of Western Australia, 27-28 September, Netherlands, pp. 93-106. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0878-2_7.
- Cometti N.N., Bremenkamp D.M., Galon K., Hell L.R., Zanotelli M.F. (2013). Cooling and concentration of nutrient solution in hydroponic lettuce crop. *Horticultura Brasileira* 31: 287-292. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362013000200018>
- de Carvalho L.M.J., Gomes P.B., de Oliveira Godoy R. L., Pacheco S., do Monte P.H.F., de Carvalho J.L.V., Nutti M.R., Neves A.C.L., Vieira A.C.R.A., Ramos S.R.R. (2012). Total carotenoid content, α -carotene and β -carotene, of landrace pumpkins (*Cucurbita moschata* Duch): A preliminary study. *Food Research International* 47(2): 337-340. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.07.040>
- Fernández V., Eichert T. (2009). Uptake of hydrophilic solutes through plant leaves: current state of knowledge and perspectives of foliar fertilization. *Critical Reviews in Plant Sciences* 28: 36-68. <https://doi.org/10.1080/07352680902743069>
- Fernández V., Sotiropoulos T., Brown P. (2015). Fertilización foliar. Principios científicos y prácticas de campo. Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes (IFA). Paris, Francia, 159 pp.
- Fortis-Hernández M., García-Delgado J.D., Preciado-Rangel P., Trejo-Valencia R., Sánchez-Estrada A., Fortis-Hernández J. (2022). Commercial and phytochemical quality in biofortified 'Orejona' lettuce with zinc oxide nanoparticles. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 50(4): 12969-12969. <https://doi.org/10.15835/nbha50312969>
- Gač P., Czerwińska K., Macek P., Jaremków A., Mazur G., Pawlas K., Poręba R. (2021). The importance of selenium and zinc deficiency in cardiovascular disorders. *Environmental toxicology and pharmacology* 82: 103553. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2020.103553>
- Garza-Alonso C.A., Juárez-Maldonado A., González-Morales S., Cabrera-De la Fuente M., Cadenas-Pliego G., Morales-Díaz A.B., Trejo-Téllez L.I., Tortella G., Benavides-Mendoza, A. (2023). ZnO nanoparticles as potential fertilizer and biostimulant for lettuce. *Heliyon* 9(1): e12787. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12787>
- Gondal A.H., Zafar A., Zainab D., Toor M.D., Sohail S., Ameen S., Ijaz A.B., Imran B., Hussain I., Haider S., Ahmad I.A., Rehman B., Younas N. (2021). A detailed review study of zinc involvement in animal, plant and human nutrition. *Indian Journal of Pure & Applied Biosciences* 9(2): 262-271. <http://dx.doi.org/10.18782/2582-2845.8652>
- Haider M.U., Hussain M., Farooq M., Nawaz A. (2020). Zinc nutrition for improving the productivity and grain biofortification of mungbean. *Journal of Soil Science Plant Nutrition* 20(3): 1321-1335. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00215-z>
- Husayn D.M., Guda M.A. (2023). Effect of zinc oxide nanoparticles on biomarkers of chlorophyll and carotene in some wild plants. 2nd International Conference on Engineering and Advanced Technology, 28-29 marzo 2022 Istanbul, Turkey. AIP Conference Proceedings 2787(1): 090035. <https://doi.org/10.1063/5.0148197>
- Javed R., Yucesan B., Zia M., Gurel E. (2018). Elicitation of secondary metabolites in callus cultures of *Stevia rebaudiana* Bertoni grown under ZnO and CuO nanoparticles stress. *Sugar Technology* 20(2): 194-201. <https://doi.org/10.1007/s12355-017-0539-1>
- Juárez-Maldonado A., Ortega-Ortíz H., Morales-Díaz A.B., González-Morales S., Morelos-Moreno A., Cabrera-De la Fuente M., Sandoval-Rangel A., Cadenas-Pliego G., Benavides-Mendoza A. (2019). Nanoparticles and nanomaterials as plant biostimulants. *International Journal of Molecular Sciences* 20(1): 162. <https://doi.org/10.3390/ijms20010162>
- Kardos J., Jemnitz K., Jablonkai I., Bóta A., Varga Z., Visy J., Héja L. (2015). The Janus facet of nanomaterials. *BioMed Research International* 2015(1): 317184. <https://doi.org/10.1155/2015/317184>
- Khalid M.F., Ali A., Waheed H., Safdar M.E., Javaid M.M., Hayyat M.S., Raza A., Farooq N., Ali H.H. (2019). Exploring the role of zinc fertilization methods for agronomic bio-fortification and its impact on phenology, growth and yield cha-

- racteristics of maize. Semina: Ciências Agrárias 40(5): 2209-2222. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n5Supl1p2209>
- Lal Regar K., Kumar V., Chandra Chandola J., Shankar Patel S., Kumar Singh A., Kundu M.S., Kumar Singh S. (2022). Zinc fertilization: effects on nutrients availability and productivity of rice (*Oryza sativa* L.). International Journal of Plant & Soil Science 41-47. <https://doi.org/10.9734/ijpss%2F2022%2Fv34i1230958>
- Lamaison J.L.C., Carnet A. (1990). Contents in main flavonoid compounds of *Crataegus Monogyna* Jacq. and *Crataegus laevigata* (Poir) D.C. flowers at different development stages. Pharmaceutica Acta Helvetica 65: 315-320.
- Levenson C.W., Morris D. (2011). Zinc and neurogenesis: making new neurons from development to adulthood. Advances in Nutrition 2(2): 96-100. <https://doi.org/10.3945/an.110.000174>
- Liu R., Zhang H., Lal R. (2016). Effects of stabilized nanoparticles of copper, zinc, manganese, and iron oxides in low concentrations on lettuce (*Lactuca sativa*) seed germination: Nanotoxins or nanonutrients?. Water, Air, and Soil Pollution 227: 42. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2738-2>
- Liu H., Zhang Y.H., Yin H., Wang W.X., Zhao X.M., Du Y.G. (2013). Alginate oligosaccharides enhanced *Triticum aestivum* L. tolerance to drought stress. Plant Physiology and Biochemistry 62: 33-40. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.10.012>
- Mckean S.J. (1993). Manual de análisis de suelos y tejido vegetal: una guía teórica y práctica de metodologías. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Palmira, Colombia. 103 pp.
- Mahajan P., Dhoke S.K., Khama A.S. (2011). Effect of nano-ZnO particle suspension on growth of mung (*Vigna radiata*) and gram (*Cicer arietinum*) seedlings using plant agar method. Journal of Nanotechnology 2011(1): 696535. <https://doi.org/10.1155/2011/696535>
- Mahapatra D.M., Satapathy K.C., Panda B. (2022). Biofertilizers and nanofertilizers for sustainable agriculture: Phycoprosects and challenges. Science of The Total Environment 803: 149990. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149990>
- Mathpal B., Srivastava P.C., Shankhdhar D., Shankhdhar S.C. (2015). Zinc enrichment in wheat genotypes under various methods of zinc application. Plant Soil & Environment 61(4): 171-175. <https://doi.org/10.17221/41/2015-PSE>
- Maxfield L., Shukla S., Crane J.S. (2022). Zinc deficiency. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK493231/> (Consultado: 01/09/2023)
- Moshfeghi N., Heidari M., Asghari H.R., Abadi M.B.F., Abbott L.K., Chen Y. (2019). Effect of zinc foliar application and mycorrhizal inoculation on morpho-physiological traits and yield parameters of two barley cultivars. Italian Journal of Agronomy 14(2): 67-77. <https://doi.org/10.4081/ija.2019.1354>
- Mumivand H., Khanizadeh P., Morshedloo M.R., Sierka E., Zuk-Golaszewska K., Horaczek T., Kalaji H.M. (2021). Improvement of growth, yield, seed production and phytochemical properties of *Satureja khuzistanica* Jamzad by foliar application of boron and zinc. Plants 10: 2469. <https://doi.org/10.3390/plants10112469>
- Mustafa A., Imran M., Ashraf M., Mahmood K. (2018). Perspectives of using l-tryptophan for improving productivity of agricultural crops: A review. Pedosphere 28(1): 16-34. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60002-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60002-5)
- Niu J., Liu C., Huang M., Liu K., Yan D. (2021). Effects of foliar fertilization: a review of current status and future perspectives. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 21: 104-118. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00346-3>
- Nouet C., Motte P., Hanikenne M. (2011). Chloroplastic and mitochondrial metal homeostasis. Trends in Plant Science 16(7): 395-404. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.03.005>
- Otálora G., Piñero M.C., López-Marín J., Varó P., del Amor F.M. (2018). Effects of foliar nitrogen fertilization on the phenolic, mineral, and amino acid composition of escarole (*Cichorium endivia* L. var. latifolium). Scientia Horticulturae 239: 87-92. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.05.031>
- Padayatty S.J., Katz A., Wang Y., Eck P., Kwon O., Lee J.H., Shenglin C., Christopher C., Anand D., Sudhir K.D., Levine, M. (2003). Vitamin C as an antioxidant: evaluation of its role in disease

- prevention. *Journal of the American College of Nutrition* 22(1): 18-35. <https://doi.org/10.1080/07315724.2003.10719272>
- Pathak A., Haq S., Meena N., Dwivedi P., Kothari S.L., Kachhwaha S. (2023). Multifaceted role of nanomaterials in modulating in vitro seed germination, plant morphogenesis, metabolism and genetic engineering. *Plants* 12(17): 3126. <https://doi.org/10.3390/plants12173126>
- Pereira D.D.F., Silva T.P.D., Freire W., Souza Ê.G., Cruz E.A.D., Feitosa R.M. (2023). Agronomic characteristics and quality of lettuce cultivars in different crop seasons in western Alagoas, Brazil. *Revista Caatinga* 36: 106-114. <https://doi.org/10.1590/1983-21252023v36n112rc>
- Poorter H., Niklas K.J., Reich P.B., Oleksyn J., Poot P., Mommer L. (2012). Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist* 193(1): 30-50. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x>
- Ramírez-Barrón S.N., Sánchez-Valdés S., Puente-Urbina B.A., Martínez-Montemayor S., Esparza-González S.C., Betancourt-Galindo R. (2019). Preparación de un adhesivo sensible a la presión (PSA) con la incorporación de nanopartículas de ZnO. Estudio de sus propiedades físico-químicas y antimicrobianas. *Revista Mexicana de Ingeniería biomédica* 40(1): 1-10. <https://doi.org/10.17488/RMIB.40.1.5>
- Reddy P.V.L., Hernandez-Viezcas J.A., Peralta-Videa, J.R., Gardea-Torresdey J.L. (2016). Lessons learned: are engineered nanomaterials toxic to terrestrial plants?. *Science of the Total Environment* 568: 470-479. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.042>
- Rivera-Gutiérrez R.G., Preciado-Rangel P., Fortis-Hernández M., Betancourt-Galindo R., Yescas-Coronado P., Orozco-Vidal J.A. (2021). Zinc oxide nanoparticles and their effect on melon yield and quality. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 12(5): 791-803. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i5.2987>
- Rivero-Montejo S.D.J., Vargas-Hernandez M., Torres-Pacheco I. (2021). Nanoparticles as novel elicitors to improve bioactive compounds in plants. *Agriculture* 11(2): 134. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020134>
- Salachna P., Mizielińska M., Płoszaj-Witkowska B., Jaszczak A. (2021). Zinc oxide nanoparticles enhanced biomass and zinc content and induced changes in biological properties of red *Perilla frutescens*. *Materials* 14(20): 6182. <https://doi.org/10.3390/ma14206182>
- Sapkota S., Sapkota S., Liu Z. (2019). Effects of nutrient composition and lettuce cultivar on crop production in hydroponic culture. *Horticulturae* 5(4): 72. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5040072>
- SAS (2009). JMP User Guide. Release 8. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, US. 513 pp.
- Sharifan H., Ma X., Moore J.M., Habib M.R., Evans C. (2019). Zinc oxide nanoparticles alleviated the bioavailability of cadmium and lead and changed the uptake of iron in hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Longifolia). *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 7(19): 16401-16409. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b03531>
- Shukla P.K., Misra P., Kole C. (2016). Uptake, translocation, accumulation, transformation, and generational transmission of nanoparticles in plants. En: *Plant Nanotechnology: Principles and Practices* (Eds. Chittaranjan K., Sakthi-Kumar D., Khodakovskaya M.V.), pp. 183-218. Springer. Swizerland. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42154-4_8
- Sida-Arreola J.P., Sánchez E., Preciado-Rangel P., Márquez-Quiroz C. (2017). Does zinc biofortification affects the antioxidant activity in common bean?. *Cogent Food & Agriculture* 3(1): 1283725. <https://doi.org/10.1080/23311932.2017.1283725>
- Singleton V.L., Rossi J.A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American journal of Enology and Viticulture* 16(3): 144-158. <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>
- Sohail L., Sawati L., Ferrari E., Stierhof Y.D., Kemmerling B., Mashwani Z.U.R. (2022). Molecular effects of biogenic zinc nanoparticles on the growth and development of *Brassica napus* L. revealed by proteomics and transcriptomics. *Frontiers in Plant Science* 13: 798751. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.798751>

- Steiner A.A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and soil* 15: 134-154. <https://doi.org/10.1007/BF01347224>
- Subbaiah L.V, Prasad T.N.V.K.V, Krishna T.G., Sudhakar P., Reddy B.R., Pradeep T. (2016). Novel effects of nanoparticulate delivery of zinc on growth, productivity, and zinc biofortification in maize (*Zea mays* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 64(19): 3778-3788. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00838>.
- Subramanian K.S., Manikandan A., Thirunavukarasu M., Rahale C.S. (2015). Nano-fertilizers for balanced crop nutrition. En: *Nanotechnologies in Food and Agriculture* (Eds. Rai M., Ribeiro C., Mattoso L., Duran N.), pp. 69-80. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14024-7_3.
- Szerement J., Szatanik-Kloc A., Mokrzycki J., Mierzwa-Hersztek M. (2022). Agronomic biofortification with Se, Zn, and Fe: An effective strategy to enhance crop nutritional quality and stress defense – A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 22(1): 1129-1159. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00719-2>
- Tsonev T., Cebola-Lidon F.J. (2012). Zinc in plants: an overview. *Emirates Journal of Food & Agriculture* 24(4): 322-333.
- Wang X., Yang X., Chen S., Li Q., Wang W., Hou C., Gao X., Wang L., Wang S. (2016). Zinc oxide nanoparticles affect biomass accumulation and photosynthesis in *Arabidopsis*. *Frontiers in Plant Science* 7: 559. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01243>
- Wasaya A., Shabir M.S., Hussain M., Muhammad Ansar M., Aziz A., Hassan W., Ahmad I. (2017). Foliar application of Zinc and Boron improved the productivity and net returns of maize grown under rainfed conditions of Pothwar plateau. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 17(1): 33-45. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017005000003>
- White P.J., Broadley M.R. (2011). Physiological limits to zinc biofortification of edible crops. *Frontiers in plant science* 2: 80. <https://doi.org/10.3389/fpls.2011.00080>
- Younas A., Yousaf Z., Rashid M., Riaz N., Aftab A., Shahid M. J., Yasin H., Shahzadi Z., Maqbool Z., Feroz A., Sarwar-Khan S., Zaheer T. (2023). Contribution of biotechnological approaches to micronutrient improvements in legumes. En: *Legumes Biofortification* (Ed. Nadeem M.A., Baloch F.S., Fiaz S., Aasim M., Habyarimana E., Sönmez O., Zencirci N.), pp. 131-176. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33957-8_6
- Zia-Butt B., Nasser I. (2020). Nanofertilizers. En: *Nanoagronomy*. (Ed. Javad S.), pp. 125-152. Springer Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41275-3_8

(Aceptado para publicación el 2 de agosto de 2024)

Pradera de *Lolium perenne* L. y *Trifolium repens* L. en Asturias. IV. Producción y composición de la leche en vacas Holstein en pastoreo (con y sin suplementación): análisis de 18 años

Begoña de la Roza-Delgado*, Adela Martínez-Fernández, M. Sagrario Modroño y Alejandro Argamentería

Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario. Carretera AS-267, PK. 19, 33300 Villaviciosa. Asturias. España.

Resumen

En una finca experimental de Asturias (Norte de España; Arco Atlántico), con praderas de *Lolium perenne* y *Trifolium repens*, utilizadas en pastoreo rotacional y ensilado, aprovechada por un rebaño de vacas frisónas con partos de invierno, se determinó durante 18 años sucesivos la producción y calidad fisicoquímica de la leche según diversas suplementaciones, que variaban según dosis (en función de la producción o aporte fijo) y modalidades de concentrado (rico en almidón o en fibra digestible). A cada lote de animales se asignaron diferentes parcelas de pastoreo manteniendo una misma carga de 2,2 UGM/ha. Paralelamente a estos ensayos de larga duración, se efectuaron balances en energía y nitrógeno sobre vacas individualizadas en nave metabólica. Los resultados se emplearon para modelizar la producción y composición de la leche según semana de lactación mediante la función gamma incompleta con resultados concordantes. Las vacas en base a forraje produjeron 4.221 kg leche/vaca·año con 3,68 % de grasa y 3,01 % de proteína. Las novillas no pudieron permanecer sin suplementación y la respuesta a la misma se situó entre 1,55-1,82 kg leche/kg MS concentrado, influyendo más la dosis que la naturaleza del concentrado. El aporte fijo de concentrado (5 kg/cabeza·día) resultó la suplementación más efectiva y el concentrado con fibra de alta digestibilidad elevó el contenido en grasa de la leche.

Palabras clave: Vacuno lechero, pastoreo rotacional, calidad fisicoquímica de la leche.

Sown meadows of *Lolium perenne* and *Trifolium repens* in Asturias IV. Milk production and composition in grazing Holstein cows (with and without supplementation): 18-year analysis

Abstract

Production and quality of milk were determined for 18 successive years according to different supplements, in an experimental farm in Asturias (Northern Spain; Atlantic Arc), provided with *Lolium perenne* and *Trifolium repens* sown meadows, used for rotational grazing and silage by a herd of Friesian dairy cows with grouped winter calvings. The concentrate used for supplementation varied according to dose

* Autor para correspondencia: broza@serida.org

Cita del artículo: De la Roza-Delgado B., Martínez-Fernández A., Modroño M.S., Argamentería A. (2024). Pradera de *Lolium perenne* L. y *Trifolium repens* L. en Asturias. IV. Producción y composición de la leche en vacas Holstein en pastoreo (con y sin suplementación): análisis de 18 años. ITEA-Información Técnica Económica Agraria 120(4): 360-379. <https://doi.org/10.12706/itea.2024.012>



(depending on yield or fixed contribution) and concentrate type (rich in starch or digestible fiber). Different grazing plots were assigned to each dairy group, maintaining the same stocking rate of 2.2 UGM/ha. Parallel to these long-term trials, energy and nitrogen balances were carried out on individualized cows in a metabolic house. The results in this regard were used to model milk production and composition by lactation week using the incomplete gamma function with concordant results. Forage-based cows produced 4,221 kg milk/cow-year with 3.68 % fat and 3.01 % protein. The heifers could not remain without supplementation and the response to it was between 1.55-1.82 kg milk/kg DM concentrate. The concentrate dose had more influence on milk production than the nature of this. The most effective supplementation was the fixed concentrate intake of 5 kg/head-day and the highly digestible fiber concentrate increased the milk fat content.

Keywords: Milk cows, rotational grazing, physical-chemical quality of milk.

Introducción

La producción de leche de vaca constituye una actividad estratégica para el desarrollo económico y el equilibrio territorial de determinadas zonas del Estado español, sobre todo, en la denominada España húmeda (Flores-Calvete *et al.*, 2022). Los sistemas lecheros basados en pastos y forrajes están muy extendidos por todo el Arco Atlántico europeo y tienen influencia en la calidad de la leche (De La Torre-Santos *et al.*, 2021). En la zona costera del Norte de España, los sistemas de producción de leche no pueden ser tan extensivos como en otros países de zonas templado-húmedas, debido a las limitaciones de disponibilidad de superficie, topografía, etc., por lo que se requiere una mayor suplementación, sin dejar de aprovechar lo máximo posible el valor nutritivo de los forrajes de estas áreas geográficas. En Asturias, al igual que en Galicia, en el último cuarto del pasado siglo se observó una reducción en el uso de forrajes, en paralelo a la evolución de los sistemas de producción de leche hacia modelos más intensivos (Flores *et al.*, 2011). No obstante, la estrategia agroambiental de la PAC (2023-2027) esta encaminada a aumentar la sostenibilidad de los ecosistemas agrarios, reforzando el respeto de las normas agrícolas y ambientales que favorezcan la protección

contra la erosión, el mantenimiento de la materia orgánica y la estructura del suelo, la calidad de las aguas, y los procesos del ecosistema. Además, hay una clara tendencia de los consumidores a incluir en la dieta leche y derivados producidos con animales en pastoreo, relacionada con aspectos éticos en el manejo animal.

Las praderas son los principales cultivos forrajeros de las explotaciones ganaderas de leche de Galicia y toda la Cornisa Cantábrica. Su correcto aprovechamiento mediante el pastoreo permite disponer de un forraje barato y de gran calidad nutritiva (Vázquez Yáñez *et al.*, 2005). Además, el perfil de ácidos grasos y antioxidantes de la leche está relacionado con el sistema de alimentación de las vacas lecheras, de forma que el pastoreo disminuye la proporción de ácidos grasos saturados y aumenta el contenido de ácidos grasos insaturados, como el ácido linoleico conjugado (CLA), y los antioxidantes, como luteína y β -criptoxantina (De La Torre-Santos *et al.*, 2021). De acuerdo con Flores-Calvete *et al.* (2022), los compuestos carotenoides y tocoferoles, presentes en los pastos y forrajes, son fuentes de vitaminas A y E, tienen carácter antioxidante y, dado su carácter lipofílico, están presentes en la grasa de la leche y se consideran de interés por su carácter bioactivo con efectos positivos para la salud humana.

Iniciada la actividad investigadora en la Unidad de Producción de Leche del Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario del Principado de Asturias (SERIDA), Balch (1989) y Balch y Argamenteira (1992) observaron que, el descenso del contenido en proteína de la leche durante el verano en Asturias, estaba asociado a una pérdida de condición corporal, sugiriendo una situación de subalimentación energética. Paralelamente, en la finca experimental del SERIDA, próxima a Villaviciosa (Norte de España, Arco Atlántico; 43° 28' 50" N, 5° 26' 27" W, 10 m s.n.m), rasa marítima oriental de Asturias, se determinó durante 12 años consecutivos la producción y contenido en principios nutritivos de prados, praderas y cultivos forrajeros anuales, trabajos orientados a mejorar los sistemas forrajeros de las explotaciones lecheras, en aras de aumentar la eficiencia en el uso de los recursos y minimizar los desechos y la contaminación, recogiendo la variabilidad interanual e interestacional (Martínez-Fernández et al., 2008). En el caso concreto de la pradera de *Lolium perenne* y *Trifolium repens* en régimen de sólo pastoreo, la utilización de pasto resultó de $7,27 \pm 0,211$ t MS/ha·año en $8,8 \pm 0,10$ aprovechamientos/año. La media anual $\pm$ error estándar de digestibilidad neutro detergente-celulasa fue de $65,0 \pm 0,47$ % para las ofertas y de $55,3 \pm 0,43$ % para los rechazos, con un mínimo en agosto para ambos. Permite estimar un promedio anual de digestibilidad in vivo de la materia orgánica superior a $73,1 \pm 0,27$ %, equivalente a EM1x superior a $10,5 \pm 0,04$ MJ/kg MS.

Los balances nutricionales efectuados posteriormente por de la Roza-Delgado et al. (2022b) en esa misma finca y pradera, arrojaron unos resultados *in vivo* para EM1x de 11,1-11,7 MJ/kg MS en primavera, 8,9-10,2 MJ/kg MS en verano y 10,8-11,3 MJ/kg MS en otoño, concordantes con lo anterior y, sin suplementación, unidos a muy baja condición corporal

en primavera ($1,63 \pm 0,046$; escala 1-5) y verano ($1,70 \pm 0,077$). Todo lo anterior sugiere la necesidad de una suplementación que compense la pérdida de la EM1x de la pradera en verano y evite la pérdida de condición corporal. Para ello, se dispone de la información de los trabajos de de la Roza-Delgado et al. (2022b y 2023) y de los datos de producción y composición de la leche, peso vivo y condición corporal del rebaño de vacuno lechero de la finca a lo largo de 18 años (12 de ellos comunes con los periodos de balances nutricionales y habiéndose utilizado los mismos alimentos).

El objetivo general del presente trabajo fue elaborar a partir de los datos de diferentes niveles de suplementación y su repercusión en la producción de leche en vacas Holstein pertenecientes al SERIDA y recogidos a lo largo de 18 años recomendaciones de índole nutricional para suplementación de la pradera de *Lolium perenne* y *Trifolium repens* de la zona costera del Norte de España, tras el análisis de los resultados de balances nutricionales, las producciones y calidades de la leche, obtenidas en diferentes lactaciones completas a lo largo de los años.

Material y métodos

Finca experimental, rebaño e instalaciones

El estudio se realizó en 24 ha de praderas de *Lolium perenne* L. y *Trifolium repens* L., con suelo arcilloso y húmedo, divididas por cerca eléctrica en 18 parcelas de 0,8-1,9 ha para pastoreo rotacional, con bebedero de nivel en cada una e intercomunicadas entre sí y con las instalaciones por un camino de acceso. Las praderas formaban parte de la Unidad de Producción de Leche del Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (SERIDA) del Principado de Asturias.

Las praderas recibieron fertilización fosfotásica, según resultados periódicos de análisis de suelo. La fertilización nitrogenada, bajo forma de urea, consistió en coberteras de 30 kg N/ha tras cada pase de pastoreo en primavera y otoño temprano, salvo situaciones de encharcamiento, sequía o exceso de forraje. El área reservada para ensilar recibía 100 kg N/ha antes de un primer corte y 80 kg N/ha antes del segundo. El rebaño experimental lo integraban 60 cabezas de raza Holstein (10-20 % novillas de primer parto), con partos agrupados a la salida del invierno. Las medias $\pm$ errores estándar fueron de 798 $\pm$ 18 kg MS/vaca-día para la presión de pastoreo y, para las alturas de pasto, de 18,86 $\pm$ 0,85 cm a la entrada y 7,67 $\pm$ 0,36 cm a la salida. Se disponía de equipo de ordeño, patio de ejercicio, manga para manejo, parque de maquinaria e instalaciones de índole experimental, incluida una nave metabólica para vacuno lechero con nueve plazas de adaptación y seis para recolección de heces, orina y leche (de la Roza-Delgado et al., 2023).

Diseño experimental

Durante 18 años sucesivos, el rebaño experimental se dividió en tres lotes de 20 cabezas cada uno, lo más homogéneos posible en cuanto a número de lactación y fecha prevista de parto. Dicha división fue siempre al azar, pudiendo cada animal permanecer o no con el mismo tratamiento. Un lote, considerado testigo, se alimentaba exclusivamente en base a pasto y a los otros dos se les suplementó con tres concentrados diferentes (B1, B2, B) y cuatro escalas de suplementación (E1, E2, E3, E4). No hubo un cruzamiento total "concentrado $\times$ escala" y finalmente se emplearon siete suplementaciones: B1E1; B1E2, B2E1, B2E2, B2E3, B2E4, BE4. El concentrado B1 aportaba un alto contenido en proteína, procedente de una elevada inclusión de harina de pescado, mezclada con cebada. El B2 era similar, pero con la mitad de

harina de pescado y, por tanto, con menor contenido proteico. El B estaba formulado con trigo y subproductos como fuente de fibra de alta digestibilidad. La escala E1 correspondía a 9,5-0 kg concentrado/cabeza-día según producción. La escala E2, a 5-0 kg concentrado/cabeza-día según producción. La E3, a 3 kg concentrado/cabeza-día durante primavera (marzo-mayo) y 5 kg concentrado/cabeza-día el resto de la lactación. La E4, aportaba un valor constante de 5 kg concentrado/cabeza-día durante toda la lactación (Tabla 1). La suplementación asignada inicialmente a cada animal se mantenía durante toda la lactación. Los concentrados se elaboraban semestralmente y se efectuó análisis químico de las muestras recogidas a lo largo de los periodos de balance nutricional. Los promedios generales de análisis y resultados de balance energético se presentan en las Tablas 2 y 3. El concentrado se distribuyó dos veces al día, en dos dosis iguales durante dos horas después de cada ordeño diario. Los cuatro primeros años, de forma manual en comedero autotrabante y, con posterioridad, mediante dispensadores automáticos programados e identificación electrónica de cada vaca.

A cada lote de animales, se le asignaron diferentes parcelas de pastoreo, las mismas durante toda la lactación, de forma que resultase una carga ganadera de 2,2 UGM/ha. El manejo de la superficie forrajera fue el mismo según lotes, según Martínez-Fernández et al. (2008).

La producción de leche de cada vaca en cada ordeño fue registrada diariamente a lo largo de todos los ensayos. Los seis primeros años, mediante medidores manuales y posteriormente mediante un registro electrónico proporcionado por un sistema robotizado de ordeño DeLaval. A mitad de cada semana se tomaron muestras individuales de leche de cada vaca proporcionales a cada uno de los dos ordeños diarios, que fueron conservadas refrigeradas a 4 °C con conservante (di-

Tabla 1. Composición en ingredientes de los concentrados, escalas de suplementación y años en que se utilizaron.

Table 1. Ingredient composition of the concentrates, supplementation scales and years in which they were used.

Concentrado	Ingrediente	% de inclusión
B1	Cebada	75
	Harina de pescado	25
	Microcorrector vitamínico-mineral	50 g/vaca-día
B2	Cebada	85
	Harina de pescado	12,5
	Corrector vitamínico-mineral	2,5
B	Trigo	24,25
	Pulpa de remolacha	24,25
	Gluten de maíz	39
	Melaza	5,5
	Pulpa de cítricos	2,5
	Tercerilla	2
	Corrector vitamínico-mineral	2,5
Escala de suplementación	Kg concentrado/vaca-día	
E1	9,5-0 kg según producción de leche	
E2	5-0 kg según producción de leche	
E3	2 kg en primavera y 5 kg durante el resto de la lactación	
E4	5 kg durante toda la lactación	
Combinación: concentrado/escala	Año en que se aplicó	
B1E1	3 y 4	
B1E2	5 y 6	
B2E1	4 y 5	
B2E2	6 y 7	
B2E3	8	
B2E4	7, 8 y 9	
BE4	9 a 18	
Testigo sin suplementación	1 a 18 (todos)	

Tabla 2. Contenido en principios nutritivos de los concentrados B1, B2 y B (medias recortadas 20 % ± errores estándar y niveles de significación de las diferencias).
Table 2. Nutrient contents of concentrates B1, B2 and B (means trimmed 20 % ± standard errors and significance levels of the differences).

Principio nutritivo	Concentrado			p
	B1	B2	B	
Materia seca (%)	89,1 ± 0,38	89,0 ± 0,23	88,9 ± 0,09	NS
Cenizas	7,8 ± 0,56b	6,1 ± 0,22a	8,0 ± 0,12b	*
Proteína bruta	23,1 ± 0,97c	19,4 ± 0,26b	14,9 ± 0,25a	***
Extracto etéreo	4,1 ± 0,38c	3,3 ± 0,07b	2,7 ± 0,12a	*
Fibra bruta	5,7 ± 0,39b	4,5 ± 0,14a	8,8 ± 0,23c	**
Materiales extractivos libres de nitrógeno	59,4 ± 1,69c	66,7 ± 0,29b	65,6 ± 0,41a	*
Fibra neutro detergente	26,6 ± 1,82b	21,8 ± 0,71a	27,9 ± 0,73b	**
Fibra neutro detergente libre de cenizas	26,5 ± 1,81b	21,3 ± 0,69a	27,8 ± 0,71b	**
Energía bruta (MJ/kg materia seca)	18,1 ± 0,37b	18,3 ± 0,11b	17,4 ± 0,14a	***

a,b,c: Valores acompañados de distinta letra en la misma columna difieren a $p \leq 0,05$.

Tabla 3. Contenido en energía digestible (MJ/kg MS), energía metabolizable (MJ/kg MS) y energía neta de lactación (Mcal/kg MS) de los concentrados B1, B2 y B.
Table 3. Content in digestible energy (MJ/kg DM), metabolizable energy (MJ/kg DM) and net energy of lactation (Mcal/kg DM) of concentrates B1, B2 and B.

Concentrado	ED resultante	EM resultante	ED1x	EM1x	UFL/kg MS	ENI3x
B1	14,5	13,1	15,7	12,8	1,44	1,87
B2	14,5	12,7	15,7	12,7	1,17	1,90
B	13,8	12,2	14,1	10,7	1,19	1,95

ED: Energía digestible; EM: Energía metabolizable; UFL: Unidades forrajeras leche; ENI: Energía neta de lactación. 1x: Valores referidos a nivel de mantenimiento; 3x: Valores referidos a nivel de alimentación = 3.

cromato potásico) y se trasladaron al Laboratorio Interprofesional Lechero de Asturias (LILA), para su análisis de calidad fisicoquímica determinándose el contenido en grasa, proteína, lactosa y sólidos no grasos, mediante MilkoScan FT 6000.

El peso vivo de cada animal se determinó al parto y al inicio y final de cada periodo de balance nutricional (báscula Salter de 1000 ± 0,1 kg) y la condición corporal fue estimada mensualmente según escala 1-5 de García-Paloma (1990).

Con el fin de garantizar la independencia lineal entre observaciones (Robinson, 2016; Lamberson 2016), se tomaron como variables dependientes finales los promedios anuales de cada uno de los tres rebaños, considerándose el año como repetición.

En los últimos doce años, los ensayos se completaron con determinaciones de digestibilidad, balances en energía y nitrógeno e ingestibilidad y nivel de sustitución, sobre las vacas de los mismos rebaños experimentales individualizadas en una nave metabólica y recibiendo la misma dieta que el resto del rebaño. Los valores de producción y calidad físico-química de la leche pudieron así vincularse a unas características del animal (peso vivo, variación del mismo, condición corporal y semana de lactación) rigurosamente controladas (de la Roza-Delgado et al., 2022a, 2022b y 2023). Los datos recogidos se utilizaron para modelizar curvas de lactación y comprobar la concordancia con los resultados de lactaciones completas, mediante el modelo de curva de lactación según Wood (1976), en el cual se considera que, la evolución de la producción y composición de la leche (Y) en función de la semana de lactación (n), no es lineal, sino que se ajusta a una función gamma incompleta:

$$Y = a \times n^b \times e^{c \times n} \quad [1]$$

La totalidad de los datos recogidos y las fuentes de variación consideradas no permiten estimar con suficiente precisión los tres coeficientes a, b, c de la ecuación de Wood (1976), por ello, se adoptaron los valores originales b y c del mencionado modelo, basados en cientos de miles de datos y, en función de ellos, se calculó el término $n^b \times e^{c \times n}$, como única variable independiente. Se consideró además el efecto fijo de la suplementación. No fue posible incluir el del forraje, debido a que, como consecuencia de la agrupación de partos, su efecto se confunde con el de la semana de lactación: durante fase creciente y

máximo de lactación se ingiere siempre hierba de primavera, a mitad de lactación hierba de verano (o ensilado de hierba en caso de sequía) y, al final de lactación, hierba de otoño o ensilado de hierba.

Análisis estadístico

Se utilizó la aplicación informática de libre uso R Core Team (2013). Las variables de producción y composición de la leche no presentaron falta de normalidad ni de homocedasticidad. Sin embargo, por razones de homogeneidad con el resto de la información procesada en los trabajos previos, se continuó utilizando estadística robusta (Wilcox, 2017).

Producción y composición de la leche obtenida en los balances nutricionales (solo vacas multíparas)

Se utilizó el paquete estadístico MASS con el procedimiento rlm de regresión robusta según modelo:

$$Y = a \times Tn + Supl \quad [2]$$

donde:

Y = kg leche/cabeza·día, % de grasa, % de proteína, kg grasa/cabeza·día, kg proteína/cabeza·día.

Tn = Término calculado según Wood (1976) en función de n.

Supl = Efecto fijo de la suplementación

a = Coeficiente de regresión, indicativo del valor máximo potencial de producción de leche, grasa, proteína y % de estas dos últimas.

Se efectuó un ensayo preliminar considerando solamente Supl = Si, No, mediante cálculo de medias recortadas 20 % y test de Youen.

A continuación, se procedió al contraste definitivo Supl = B1E1, B1E2, B2E1, B2E2, B2E3, B2E4, BE4. Las diferencias según niveles del factor Supl, se establecieron a continuación

Tabla 4. Producción de leche y contenidos en grasa y proteína según función gamma incompleta y efecto de la suplementación (sólo vacas multiparas).

Table 4. Milk yield and fat and protein contents according to incomplete gamma function and supplementation effect (only multiparous cows).

Modelo	$Y = a \times n^b \times e^{(c \times n)} + \text{Supl}$				
Y =	Producción de leche (kg/día)	Grasa (%)	Proteína (%)	Grasa (kg/día)	Proteína (kg/día)
a =	26,00	1,11	4,96	1,60	0,85
b =	0,20	-0,13	-0,12	0,07	0,08
c =	-0,04	0,02	0,01	-0,02	-0,03
Iteraciones	8	5	9	6	5
Estimación de escala	3,7	0,57	0,24	0,16	0,11
Efecto suplementación					
B1E1	-2,0ab	3,46b	-1,01	-0,46b	0,012ab
B1E2	-1,7ab	2,67a	-1,33	-0,60a	-0,027ab
B2E1	-3,9ab	3,23ab	-1,08	-0,57a	-0,069ab
B2E2	-3,7ab	2,78a	-1,35	-0,64a	-0,091ab
B2E3	1,4ab	2,91ab	-1,46	-0,40b	0,056ab
B2E4	1,5b	2,75a	-1,29	-0,44b	0,072b
BE4	1,2ab	2,89ab	-1,34	-0,43a	0,058ab
No	-5,2a	3,07ab	-1,30	-0,65b	-0,135a

n: Semana de lactación; Supl: Efecto de la suplementación. B1: 75 % cebada + 25 % harina de pescado + microcorrector. B2: 85 % cebada + 12,5 % harina de pescado + 2,5 % corrector vitamínico mineral. B: Subproductos + 2,5 % corrector vitamínico mineral. No: Sin suplementación. E1 = 9,5-0 kg/día según producción; E2 = 5-0 kg/día según producción; E3 = 2 kg/día durante primavera y 5 kg/día el resto del año; E4 = 5 kg/día constante. a,b: Señala $p < 0,05$; si no lleva letra será no significativo.

con el paquete estadístico WRS2, mediante análisis de varianza robusto *t1way*, seguido de los contrastes lineales entre suplementaciones.

A continuación, se efectuaron contrastes dos a dos, dentro de suplementación Sí, también con medias recortadas 20 % y *t1way*. Ver Tabla 4.

Producción y composición de la leche según lactaciones completas (vacas y novillas)

Como las novillas demostraron desde un principio que no podían mantenerse exclusivamente en base a sólo forraje, el contraste suplementación Sí vs. No, sólo se pudo efectuar sobre vacas, mediante cálculo de medias recortadas 20 % y test de Youen.

Resultados

Ensayo previo: contrastes de suplementación = Sí vs. suplementación = No

Sin ingestión de concentrado, se reducen las producciones de leche, de grasa y de proteí-

na ($p < 0,001$ en los tres casos) y no se presentan efectos significativos sobre los % de estas dos últimas.

Evolución de la producción de leche, grasa, y proteína según semanas de lactación y modalidad de suplementación (vacas multíparas; balances nutricionales)

En cuanto a los efectos concretos de cada suplementación, como se puede apreciar en la Tabla 4, sólo la modalidad B2E4 elevó significativamente la producción de leche y la de proteína. Las restantes modalidades, influyen sobre el contenido y producción de grasa de forma muy variable y, no siempre en el mismo sentido. No obstante, la respuesta a la suplementación en general, es de 1,82 kg leche/kg MS concentrado.

Lactaciones completas de vacas multíparas y novillas

Las novillas no pudieron mantenerse en pastoreo sin suplementación. La pérdida de peso resultó excesiva y, ya desde el inicio de las sucesivas experiencias, tuvieron que ser excluidas de los rebaños testigo, así como de los balances nutricionales.

Con relación a los rendimientos obtenidos por las vacas multíparas, la producción total de las novillas fue del 68,4 % para leche; 64,5 % para grasa y 67,0 % para proteína. En cuanto a los % de grasa y proteína, aunque superiores en vacas, no presentaron significación estadística.

Como era de esperar, las vacas, sin suplementación, produjeron menos leche que las vacas con suplementación, siendo la reducción de 157 kg grasa/vaca-año y 128 kg proteína/vaca-año.

La respuesta a la suplementación en vacas, incrementó la producción de leche, con una respuesta de 1,55 kg leche/kg MS concen-

trado ($p < 0,001$). También elevó el % de proteína ($p < 0,01$) y la producción de dicho componente ($p < 0,001$). Sin embargo, se redujo el % de grasa ($p < 0,05$), no quedando afectada significativamente la producción total de este componente.

Respecto a efectos sobre la condición corporal, contrastando previamente en vacas multíparas Suplementación = No vs. Si, las medias trimadas $20 \% \pm$ error estándar resultaron respectivamente $1,70 \pm 0,032$ vs. $1,80 \pm 0,034$ ($p = 0,05$).

En la Tabla 5, se presenta la influencia de cada modalidad de suplementación sobre las lactaciones de vacas y novillas. Con las escalas E3 y E4, se obtuvo mayor producción de leche, de grasa y de proteína que con las escalas E1 y E2, pero sin diferencias significativas para los % de grasa y de proteína.

Con la escala E1, se obtuvo mayor producción de leche que con la E2 ($p < 0,01$). Aunque no se alcanzase el nivel de significación $p \leq 0,05$, se considera conveniente tener también en cuenta que, con la escala E1, se dio menor % de grasa ($p = 0,058$) y mayor de proteína ($p = 0,100$). Así mismo, hay que considerar la mayor producción de leche obtenida con el concentrado B1 ($p = 0,068$). Aplicando la escala E4, el concentrado B fue el que generó mayor % y producción de grasa ($p \leq 0,05$, en ambos casos).

La Tabla 6 presenta los efectos sobre la condición corporal de las siete suplementaciones empleadas. La suplementación B1E1 permite un mayor promedio anual frente a las restantes, a excepción de B2E1.

Producción y calidad de la leche estimadas según función gamma incompleta vs. los valores reales obtenidos en lactaciones completas

La Figura 1 presenta en diagrama de barras los valores reales y los estimados para el parámetro producción de leche total por lacta-

Tabla 5. Lactaciones completas del rebaño de vacas lecheras (vacas y novillas): producción y composición de la leche promedio de 18 años. Medias recortadas 20 % $\pm$ error estándar.

Table 5. Total lactations of the herd of dairy cows (primiparous and multiparous cows): 18 years average milk production and composition. 20 % trimmed means $\pm$ standard error.

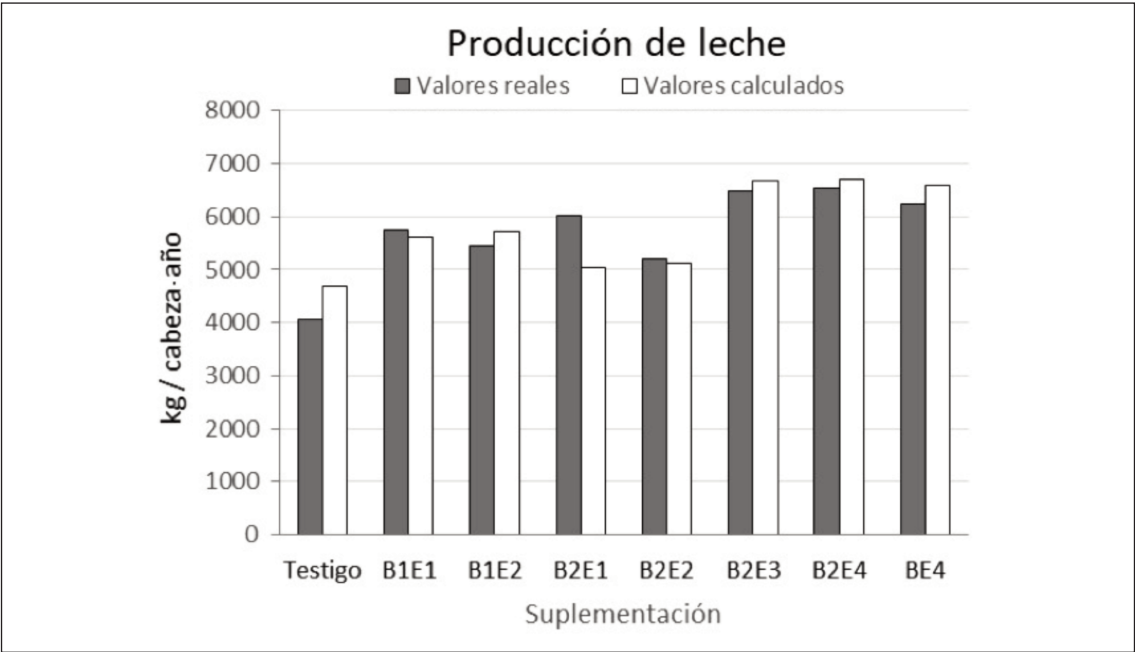
	Leche		Grasa		Proteína
	kg/cabeza·año	%	kg/cabeza·año	%	kg/cabeza·año
Animal					
Novillas	4164 $\pm$ 198,1	3,24 $\pm$ 0,095	138 $\pm$ 7,0	3,09 $\pm$ 0,048	128 $\pm$ 5,5
Vacas	6085 $\pm$ 168,4	3,51 $\pm$ 0,092	214 $\pm$ 8,6	3,15 $\pm$ 0,031	191 $\pm$ 5,3
Suplementación(Concentrado_Escala)					
B1_E1	5276 $\pm$ 294,1	3,06 $\pm$ 0,137	162 $\pm$ 15,5	3,15 $\pm$ 0,041	166 $\pm$ 10,2
B1_E2	4521 $\pm$ 588,5	3,34 $\pm$ 0,111	152 $\pm$ 21,5	3,09 $\pm$ 0,014	140 $\pm$ 18,6
B2_E1	4888 $\pm$ 627,3	3,23 $\pm$ 0,158	160 $\pm$ 25,0	3,2 $\pm$ 0,046	156 $\pm$ 20,1
B2_E2	3983 $\pm$ 712,2	3,54 $\pm$ 0,056	140 $\pm$ 23,2	3,11 $\pm$ 0,022	124 $\pm$ 21,5
B2_E3	5330 $\pm$ 1157,0	3,17 $\pm$ 0,110	170 $\pm$ 42,2	3,23 $\pm$ 0,010	172 $\pm$ 36,5
B2_E4	5680 $\pm$ 461,3	3,40 $\pm$ 0,126	193 $\pm$ 17,2	3,11 $\pm$ 0,064	176 $\pm$ 13,8
B_E4	5536 $\pm$ 393,5	3,87 $\pm$ 0,155	215 $\pm$ 20,0	3,05 $\pm$ 0,122	169 $\pm$ 14,9
Contrastes					
Novillas vs. vacas	***	ns	***	ns	***
Escalas E1, E2 vs. E3, E4	**	ns	***	ns	**
Dentro de escalas E1 y E2:					
Animal	***	ns	***	ns	***
Concentrado	p = 0,068	ns	ns	ns	ns
Escala	**	p = 0,058	ns	p = 0,100	**
Interacciones	ns	ns	ns	ns	ns
Dentro de escala E4:					
Animal	***	ns	***	ns	***
Concentrado	ns	*	*	ns	ns
Animal: Concentrado	ns	ns	ns	ns	ns

n: Semana de lactación; Supl: Efecto de la suplementación. B1: 75 % cebada + 25 % harina de pescado + microcorrector. B2: 85 % cebada + 12,5 % harina de pescado + 2,5 % corrector vitamínico mineral. B: Trigo + subproductos + 2,5 % corrector vitamínico mineral. No: Sin suplementación. E1 = 9,5-0 kg/día según producción; E2 = 5-0 kg/día según producción; E3 = 2 kg/día durante primavera y 52 kg/día el resto del año; E4 = 5 kg/día constante.

Tabla 6. Condición corporal según suplementación (media anual recortada 20 % ± error estándar).
Table 6. Body condition score according to supplementation (annual mean trimmed 20 % ± standard error).

Modalidad de suplementación	Condición corporal (promedio anual)
B1E1	2,13 ± 0,045 b
B1E2	1,76 ± 0,099 a
B2E1	1,72 ± 0,249 ab
B2E2	1,78 ± 0,078 a
B2E3	1,87 ± 0,092 a
B2E4	1,80 ± 0,040 a
BE4	1,82 ± 0,127 a
Testigo sin suplementación	1,68 ± 0,031 a

Concentrados: B1: 75 % cebada + 25 % harina de pescado + microcorrector vitamínico-mineral. B2: 85 % cebada + 12,5 % harina de pescado + 2,5 % corrector vitamínico-mineral. B: Trigo + subproductos + Corrector vitamínico-mineral.a,b: Valores acompañados de distinta letra en la misma columna difieren a $p \leq 0,05$. Escalas de suplementación: E1 = 9,5-0 kg/día según producción; E2 = 5-0 kg/día según producción; E3 = 2 kg/día durante primavera y 52 kg/día el resto del año; E4 = 5 kg/día constante.



B1: 75 % cebada + 25 % harina de pescado + microcorrector. B2: 85 % cebada + 12,5 % harina de pescado + 2,5 % corrector vitamínico mineral. B: Trigo + subproductos + 2,5 % corrector vitamínico mineral. E1 = 9,5-0 kg/día según producción; E2 = 5-0 kg/día según producción; E3 = 2 kg/día durante primavera y 5 kg/día el resto del año; E4 = 5 kg/ día constante.

Figura 1. Producción de leche con lactaciones completas versus valores calculados según función gamma incompleta (vacas multiparas) y escala de suplementación.
Figure 1. Milk yield with full lactations versus values calculated according to incomplete gamma function (multiparous cows) and scale of supplementation.

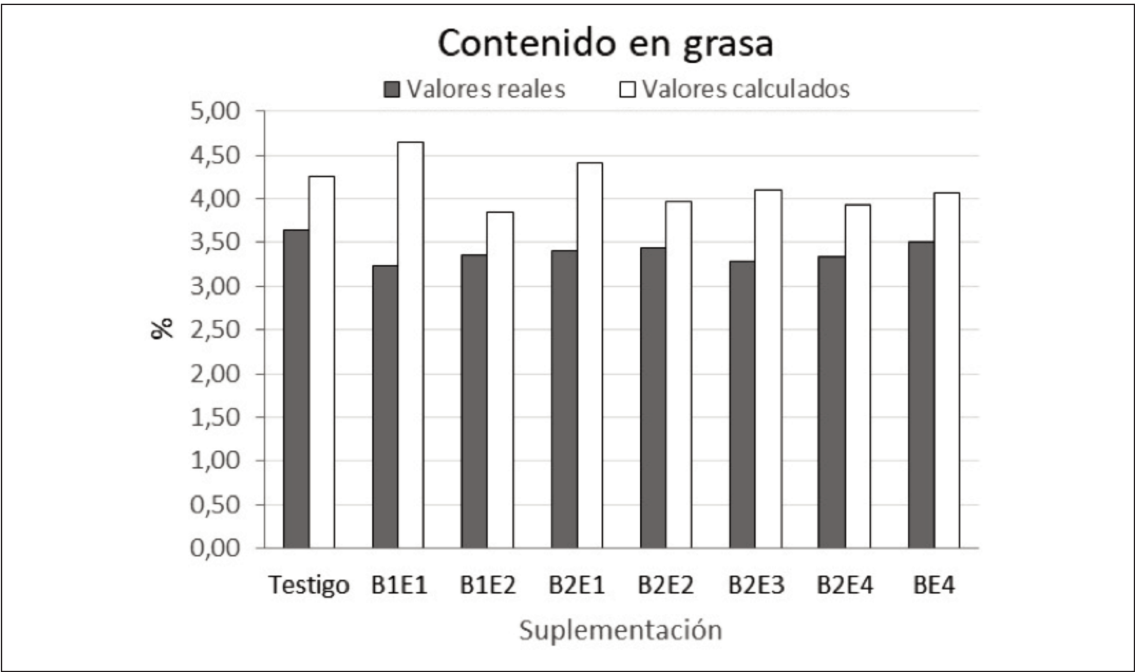
ción completa. Las mayores diferencias se presentan en los lotes testigo, siendo los valores estimados superiores en unos 800 kg/cabeza·año y con la suplementación B2E1 con una diferencia de unos 1.000 kg/cabeza·año superior para los valores reales tomados de las lactaciones completas.

La Figura 2 muestra los valores del contenido en grasa (%) de la leche. Tanto para los lotes testigo, como para las diferentes escalas de suplementación, los valores calculados según la función gamma incompleta resultaron muy superiores a los valores reales, que en el

caso de la suplementación B1E1, llegó a ser superior en más de 1,30 % en valor absoluto.

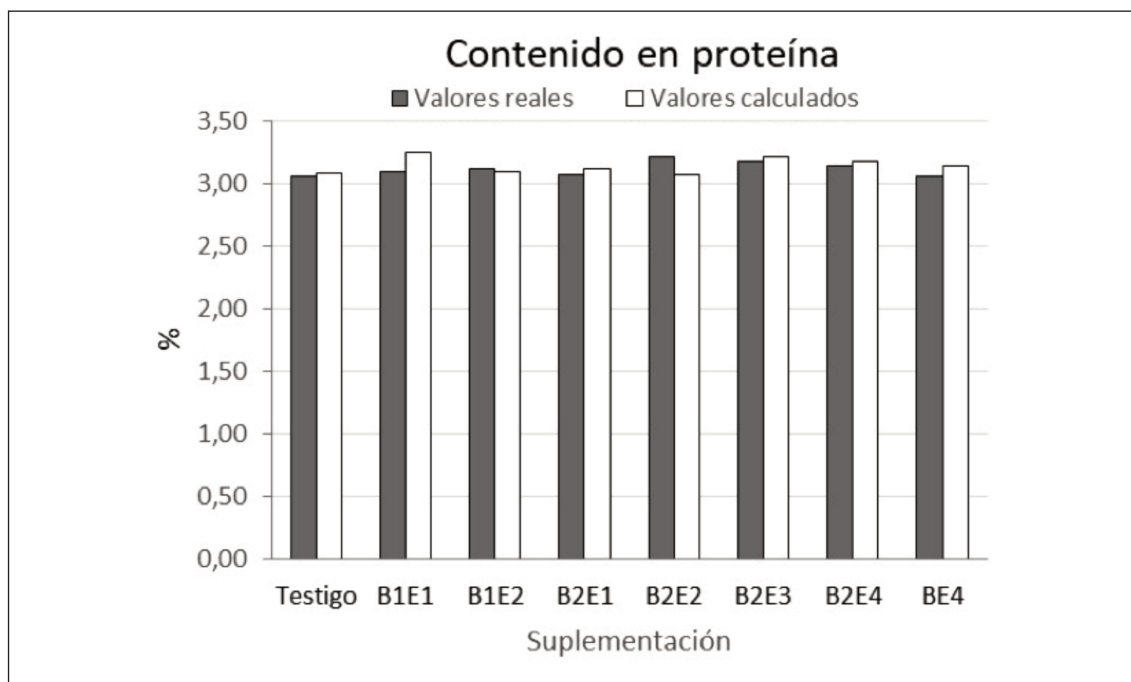
La Figura 3 muestra los valores del contenido en proteína (%) de la leche. Para este parámetro apenas hubo diferencias entre los valores reales y los estimados según la función gamma incompleta.

Las Figuras 4 y 5 presentan los valores de producción total de grasa y proteína de la leche en lactaciones completas, resultando las mismas diferencias que las indicadas para los contenidos en estos parámetros.



B1: 75 % cebada + 25 % harina de pescado + microcorrector. B2: 85 % cebada + 12,5 % harina de pescado + 2,5 % corrector vitamínico mineral. B: Trigo + subproductos + 2,5 % corrector vitamínico mineral. E1 = 9,5-0 kg/día según producción; E2 = 5-0 kg/día según producción; E3 = 2 kg/día durante primavera y 5 kg/día el resto del año; E4 = 5 kg/día constante.

Figura 2. Contenido en grasa (%) de la leche en lactaciones completas *versus* valores calculados según función gamma incompleta (vacas multíparas) y escala de suplementación.
Figure 2. Milk fat content (%) with full lactations *versus* values calculated according to incomplete gamma function (multiparous cows) and scale of supplementation.



B1: 75 % cebada + 25 % harina de pescado + microcorrector. B2: 85 % cebada + 12,5 % harina de pescado + 2,5 % corrector vitamínico mineral. B: Trigo + subproductos + 2,5 % corrector vitamínico mineral. E1 = 9,5-0 kg/día según producción; E2 = 5-0 kg/día según producción; E3 = 2 kg/día durante primavera y 5 kg/día el resto del año; E4 = 5 kg/día constante.

Figura 3. Contenido en proteína (%) de la leche en lactaciones completas versus valores calculados según función gamma incompleta (vacas multíparas) y escala de suplementación.

Figure 3. Milk protein content (%) with full lactations versus values calculated according to incomplete gamma function (multiparous cows) and scale of supplementation.

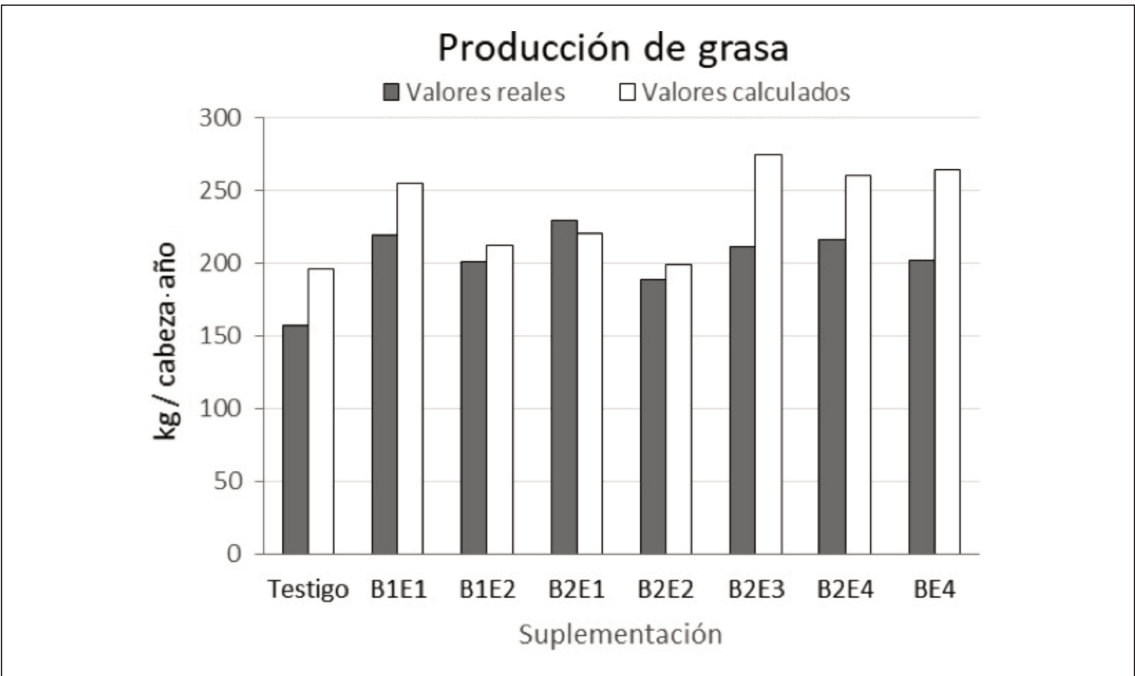
Discusión

Efectos de las escalas de suplementación y de las modalidades de concentrado

Los resultados procedentes de los balances nutricionales y los obtenidos sobre lactaciones completas, ponen de relieve que, la suplementación debe compensar la caída del valor nutritivo de la hierba durante el verano (Martínez-Fernández *et al.*, 2008; de la Roza-Delgado *et al.*, 2022a), a la vez que atender al incremento de las necesidades nutritivas durante la fase creciente de lactación (de la Roza-Delgado *et al.*, 2022b).

En vacas sin suplementación, la menor condición corporal unida a un menor contenido en proteína de la leche, señala una situación de déficit energético (Balch y Argamentería, 1992). Este hecho se apoya en las determinaciones de valor energético de la hierba a lo largo del año ya mencionadas.

La escala de suplementación E1, correspondiente a mayores dosis de concentrado en primavera, logró frenar la pérdida inicial de condición corporal, siendo la única que permitió un promedio anual de condición corporal superior a 2. De hecho, conforme con Chamberlain y Wilkinson (1996) la condición



B1: 75 % cebada + 25 % harina de pescado + microcorrector. B2: 85 % cebada + 12,5 % harina de pescado + 2,5 % corrector vitamínico mineral. B: Trigo + subproductos + 2,5 % corrector vitamínico mineral. E1 = 9,5-0 kg/día según producción; E2 = 5-0 kg/día según producción; E3 = 2 kg/día durante primavera y 5 kg/día el resto del año; E4 = 5 kg/día constante.

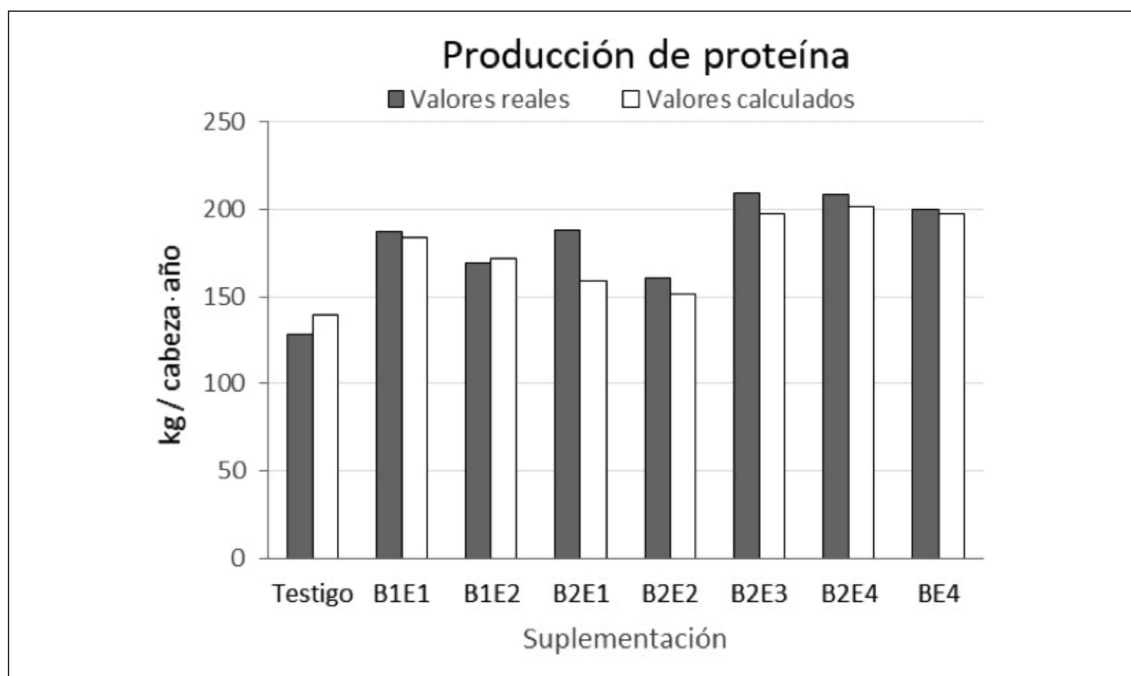
Figura 4. Producción de grasa total de la leche en lactaciones completas versus valores calculados según función gamma incompleta (vacas múltiparas) y escala de suplementación.
Figure 4. Milk fat yield with full lactations versus values calculated according to incomplete gamma function (multiparous cows) and scale of supplementation.

corporal nunca debe descender por debajo de 2,0, aunque otros autores dan un límite aún más estricto, de 2,5 (Heinrichs y Ishler, 2011). Los resultados obtenidos en balances nutricionales (de la Roza-Delgado et al., 2022b), arrojan valores de condición corporal bajos, inferiores a 2.

La escala de suplementación E2, que totaliza la menor cantidad de kg concentrado/cabeza·año, resultó muy insuficiente, en particular para las novillas. En primavera, frenó la pérdida de condición corporal tanto como la E1, pero resultó incapaz de mantener la persistencia de la lactación y contribuyó al sín-

drome de bajo contenido en proteína de la leche durante el verano en Asturias (Balch, 1989).

La escala E3, pretendió observar si una reducción en el aporte de concentrado durante primavera tras el máximo de producción, quedaba compensado por el mayor valor energético de la hierba en dicha época, pero también implicó una subalimentación en la época de lactación. Los valores de condición corporal y de producción de leche no fueron significativamente inferiores con respecto a E4, pero el hecho de que ambas hayan descendido a la vez sugiere que el mayor contenido energético de la hierba de primavera



B1: 75 % cebada + 25 % harina de pescado + microcorrector. B2: 85 % cebada + 12,5 % harina de pescado + 2,5 % corrector vitamínico mineral. B: Trigo + subproductos + 2,5 % corrector vitamínico mineral. E1 = 9,5-0 kg/día según producción; E2 = 5-0 kg/día según producción; E3 = 2 kg/día durante primavera y 5 kg/día el resto del año; E4 = 5 kg/día constante.

Figura 5. Producción de proteína total de la leche en lactaciones completas versus valores calculados según función gamma incompleta (vacas multíparas) y escala de suplementación.

Figure 5. Milk protein yield with full lactations versus values calculated according to incomplete gamma function (multiparous cows) and scale of supplementation.

no permite reducir tanto la suplementación (Balch y Argamentería, 1992).

La escala E4 dio origen a la mayor producción de leche y permitió llegar a un máximo absoluto de 7.233 kg leche/vaca multípara-año con el 3,23 % de grasa y 3,24 % de proteína. Durante primavera, las escalas E2 y E4 fueron idénticas, pero, en verano y otoño la E4 es superior. De ahí la respuesta observada en producción.

La influencia de la naturaleza del concentrado fue menor que la de la escala de suplementación. Este hecho, en general, concuerda

con Sayers et al. (2003). Pero, aun así, hay dos hechos a destacar. El primero, que la mayor producción de leche y condición corporal media con el concentrado B1 debe imputarse a que, según los resultados de balances nutricionales sintetizados en Tabla 5 (de la Roza-Delgado et al., 2020b), era el de mayor contenido energético y, en consecuencia, a igualdad de escala generaba un mayor nivel de alimentación. Pero, a costa de un bajo contenido en grasa de la leche, que también acontece con el concentrado B2. En efecto, es conocida desde hace mucho tiempo la depresión del contenido en grasa de la leche por efecto del almidón

(Balch et al., 1955). Los concentrados B1 y B2, son esencialmente amiláceos.

El segundo, es el mayor contenido y producción de grasa láctea obtenidos con el concentrado B (3,87 %, 215 g/día), ya no concuerda con las observaciones de Sayers et al. (2003), antes citados. El que además, el elevado contenido en grasa se haya conseguido no sólo sin afectar negativamente al contenido y producción de proteína, sino incluso mejorando la utilización del nitrógeno ingerido (de la Roza-Delgado et al., 2020b), constituye un hecho de interés para la finalidad que se persigue con estos trabajos, que consiste en optimizar la suplementación para la producción de leche en pastoreo.

De acuerdo con Flores-Calvete et al. (2022) el porcentaje promedio en grasa de la leche bovina del último quinquenio en Asturias fue de 3,76 %, sólo inferior a Galicia; acorde con el obtenido con el concentrado B en el presente trabajo. No obstante, es bien conocido que el perfil graso de la leche está fuertemente influido por el sistema de producción.

Los otros dos concentrados B1 y B2, generaron valores muy bajos de grasa, sobre todo cuando se les aplicó la escala de suplementación E1.

A pesar de todo, no hay que olvidar que todos estos resultados han sido obtenidos con rebaños de vacas en pastoreo. Actualmente, se valora un elevado contenido en grasa de la leche obtenida en pastoreo, ya que dicho sistema de producción da origen a un perfil lipídico más saludable. De hecho, en los últimos años los trabajos científicos apuntan que la leche producida en las explotaciones que incluyen el régimen de pastoreo, muestran valores más altos de los ácidos grasos (AG) vaccénico, alfa-linolénico (C18:3n3, cabeza de la serie Omega-3) y ácido linoleico conjugado (CLA) total en comparación con los grupos de animales no alimentados con hierba fresca, mientras que, inversamente, el valor

del AG linoleico (C18:2cn6, cabeza de la serie Omega-6) es más bajo en las explotaciones de pastoreo en comparación con los restantes grupos. Además, la relación Omega-6/Omega-3 de la leche de las vacas que pastorean es significativamente más baja comparada con la de las que no pastorean (Morales-Almaráz et al., 2011 y 2018; Hernández-Ortega et al., 2014; Flores-Calvete et al., 2022).

Las mayores diferencias entre vacas y novillas para producción de leche, de grasa y de proteína, se dan para la suplementación B2E2, que es precisamente la que proporciona el menor aporte energético suplementario. Las menores diferencias, tienen lugar para B1E1 y BE4. La suplementación B1E1 es la que suministra mayor cantidad de proteína no degradable digestible y la BE4 la que genera el mejor aprovechamiento del nitrógeno ingerido. Todo apunta en el sentido de que es preciso prestar especial atención a las necesidades nitrogenadas de las novillas de primer parto (NRC, 2001).

En síntesis, los resultados obtenidos parecen indicar que la mejor solución sería reunir el nivel energético del concentrado B1 con el contenido proteico y en fibra digestible del B. Para novillas de primer parto, por razones de seguridad, convendría utilizar el contenido proteico del B2 y se aplicaría la escala E4.

No obstante, estas últimas consideraciones no serían suficientes, ya que resulta imprescindible controlar la pérdida de condición corporal al inicio de la lactación. Para ello, antes de salir a las praderas, las vacas deberían recibir en estabulación dietas especiales para pre y post parto, elaboradas con ensilado de hierba y otros alimentos, a los que se haya determinado su aporte en valor nutritivo y energético para que las raciones cubran los requerimientos animales (Clark 2001a,b). Es importante reconocer que la composición de los alimentos, su forma física y química, y el efecto que tiene el consumo de materia seca sobre la digestibilidad, afec-

tan el nivel de energía disponible en los alimentos (NRC, 2001). Por tanto, es necesario seguir estrictamente las recomendaciones de alguno de los sistemas de alimentación más utilizados en España (Chamberlain y Wilkinson 1996; NRC, 2001; Nozière et al., 2018) para evitar la pérdida de condición corporal. Sin embargo, con un manejo en régimen de pastoreo resulta muy difícil seguir dichas recomendaciones, teniendo en cuenta que las necesidades están afectadas por la actividad física y otros agentes ambientales como el frío o calor. No obstante, en este tipo de manejo, tras el post parto, las vacas deberían ir saliendo a las superficies disponibles de pradera para iniciar su periodo de pastoreo con suplementación, con el objetivo de tratar de conjugar la producción a bajo coste con los requerimientos nutricionales del ganado de leche para el pre y postparto.

En este trabajo no se pudieron satisfacer todos los requerimientos nutricionales de los animales, hecho que motivó un valor de condición corporal demasiado bajo a lo largo de todo el año (de Roza-Delgado et al., 2020b). En verano, la grave pérdida de valor nutritivo de la hierba no pudo ser compensada por ninguna de las modalidades de suplementación y se interrumpió la recuperación de peso vivo que había tenido lugar durante primavera, hasta reiniciarse de nuevo en otoño. Esa necesidad de destinar nutrientes a recuperación de condición corporal, interfirió con las respuestas en producción de leche.

Sin embargo, sí se observa cómo el aporte de concentrado se traduce en mayor producción de leche, aunque con menor contenido en grasa, y eleva el contenido en proteína, incrementando la producción total anual de ambos componentes. Todo ello concuerda con múltiples trabajos realizados, que han sido recogidos en las revisiones de Bargo (2003) y de Hills et al. (2015). La respuesta positiva que se produjo en producción de leche ya era esperable, en función de los resultados ob-

tenidos en los trabajos previos de dela Roza-Delgado et al. (2022a, 2022b y 2023). Además, es de señalar que, las respuestas en kg leche/kg MS concentrado (1,82 según balances nutricionales y 1,55 según lactaciones completas), resultan coincidentes con las producciones más elevadas según bibliografía, de acuerdo a las revisiones de Bargo (2003) y de Hills et al. (2015).

En cuanto al deseado efecto de incrementar el contenido en proteína de la leche, el contraste general entre suplementación Sí vs. No, revela respuesta positiva altamente significativa. Los balances nutricionales dejan entrever un efecto positivo de la escala E1, pero no resulta significativo. En este sentido, los ensayos de lactaciones completas dieron una significación $p = 0,100$ a favor de la escala E1. Esta repetibilidad de los hechos sugiere que hubo realmente una elevación del contenido en proteína de la leche inducida por la suplementación.

En síntesis, los resultados obtenidos parecen indicar que la mejor solución sería reunir el nivel energético del concentrado B1 con el contenido proteico y en fibra digestible del B.

Predicciones de los resultados de lactaciones completas a partir de los resultados obtenidos en los balances nutricionales

La concordancia entre las predicciones de producción y calidad fisicoquímica de la leche según función gamma incompleta y los resultados realmente obtenidos, se considera aceptable, excepto para producción de leche sin suplementación (infravalorada), y, sobre todo, para contenido en grasa en general (muy sobrevalorado). En este sentido, debe tenerse en cuenta lo expuesto acerca de las reservas corporales sin suplementación y los efectos no explicables de la suplementación B1E1, que suministra mayor cantidad de proteína no degradable digestible.

No se logró predecir la disminución del contenido en grasa imputable a los concentrados B1 y B2 e incluso, se llegó a estimar incremento con la suplementación B1E1, lo cual resulta contradictorio. Es preciso tener en cuenta que dichos modelos, basados en experiencias puntuales, no pueden recoger la incidencia de efectos multifactoriales que intervienen en el cómputo de lactaciones completas.

Tampoco se puede pretender que los resultados de balances nutricionales hayan podido recoger la necesidad de destinar nutrientes a recuperación de condición corporal, lo cual interfirió con las respuestas en producción de leche.

Conclusiones

La producción de leche en base a sólo forraje que permiten las praderas de la zona costera del Norte de España (Arco Atlántico) aunque menor que la obtenida en estabulaciones permanentes, es elevada, pero su aporte nutritivo resulta insuficiente ante el potencial genético del ganado frisón actual. Asimismo, el contenido en proteína de la leche obtenida mediante régimen de solo pastoreo, resulta bajo con relación a la actual demanda del sector. En cuanto al contenido de grasa presenta unos valores intermedios. Sin embargo, existe una marcada estacionalidad en la concentración de grasa y proteína en la leche, con valores notablemente inferiores en el periodo primavera-verano.

La respuesta ante la suplementación con concentrado resultó elevada, lo que se traduce en mayor producción de leche, incrementando la producción total anual de grasa y proteína. Durante fase creciente de lactación en primavera, la recomendación sería de 9,5 kg concentrado/vaca·día.

Tras el máximo de producción, a lo largo del resto de primavera, verano y otoño, 5 kg concentrado/vaca·día.

El concentrado debe contener, por kg de materia seca, un mínimo de 12,7 MJ de energía metabolizable a nivel de mantenimiento, o de 1,17 unidades forrajeras leche, o de 1,90 Mcal de energía neta de lactación.

En cuanto a nivel de proteína bruta del concentrado, resultó suficiente un 15 % sobre materia seca

Para evitar la reducción en el contenido en grasa de la leche, el contenido en fibra neutro detergente del concentrado no debe ser inferior al 28 % sobre materia seca y debe incluir materias primas que sean fuente de fibra de alta digestibilidad.

Cuando resulte necesario acudir al ensilado, por falta de pasto, es necesario realizar un análisis previo del mismo y solicitar recomendaciones nutricionales que complementen el aporte nutritivo del mismo.

Agradecimientos

Los autores agradecen al INIA la financiación de los proyectos 7582, 9043, 9626-C3-2 y SC95-0-022, que permitieron la realización de gran parte de los trabajos experimentales recogidos en la presente publicación. Además, agradecen a la Universidad de Córdoba el interés demostrado en los datos obtenidos, que fueron incluidos en su Servicio de Información sobre Alimentos (SIA).

A Alfonso Carballal Samalea, la labor informática que llevó a cabo. Y, a José Bodelo Parceró, a María Antonia Cueto Ardavín, y, a todo el personal de campo de la Unidad de Producción de Leche y al del Laboratorio de Nutrición Animal, la ejecución de las labores agroganaderas, de funcionamiento de la nave metabólica y de análisis de muestras.

Referencias bibliográficas

- Balch C.C., Balch D.A., Bartlett S., Bartrum M.P., Johnson V.W., Rowland S.J., Turner J. (1955). Studies of the secretion of milk of low fat content by cows on diets low in hay and high in concentrates: VI. The effect on the physical and biochemical processes of the reticulo-rumen. *Journal of Dairy Research* 22: 270-289. <http://doi.org/10.1017/S0022029900007810>
- Balch C.C. (1989). Contenido en proteínas de la leche de vacuno en Asturias. *Información Técnica* 5/89. Principado de Asturias. Consejería de Agricultura y Pesca. 12 pp.
- Balch C.C., Argamentería A. (1992). A note on the potential conjoint use of body condition score and milk protein concentrations as an index of dietary adequacy in lactating dairy cows. *Animal Production* 55: 437-439. <https://doi.org/10.1017/S0003356100021140>
- Bargo F. (2003). Suplementación en pastoreo: conclusiones sobre las últimas experiencias en el mundo 2ª Jornada Abierta de Lechería: "Alimentación y tipo de vaca en sistemas de base pastoril", Cátedra de Producción Lechera, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. 1 de octubre de 2022, Buenos Aires, Argentina.
- Chamberlain A.T., Wilkinson J.M. (1996). Feeding the cow before and after calving. En: *Feeding the Dairy Cow*, pp. 213-224. Chalcombe Publications, Painshall, Church Lane, Welton, Lincoln, LN2, 3LT, United Kingdom.
- Clark J. (2001a). Growth. En: *Nutrient Requirements of Dairy Cattle 7 th rev. edition* (Ed. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine), pp. 234-243. Washington, DC, National Academy Press. USA.
- Clark J. (2001b). Unique aspects of dairy cattle nutrition. En: *Nutrient Requirements of Dairy Cattle 7 th rev. Edition* (Ed. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine), pp. 184-213. Washington, DC, National Academy Press. USA.
- De La Torre-Santos S., Royo L.J., Martínez-Fernández A., Menéndez-Miranda M., Rosa-García R., Vicente F. (2021). Influence of the type of silage in the dairy cow ration, with or without grazing, on the fatty acid and antioxidant profiles of milk. *Dairy* 2(4): 716-728. <https://doi.org/10.3390/dairy2040055>
- Flores G., Resch C., Fernández-Lorenzo B., González-Arráez A., Valladares J., Dagnac T., Latorre A., Agruñá M.J., Pereira S., Díaz N., Giménez R., Rodríguez-Diz X. (2011). Efecto del pastoreo de verano de trébol violeta sobre el contenido en omega-3 de la leche de vacuno. *Pastos* 41 (1): 79-99.
- Flores-Calvete G., Botana-Fernández A., Resch-Zafra C., Lorenzana-Fernández R. (2022). Sistemas de producción y calidad de la leche de vaca en España. En: *El sector lácteo en España* (Ed. López Iglesias E., Laínez Andrés M.), pp. 299-318. Ed. Cajamar Caja Rural, España.
- Heinrichs A.V., Ishler V.A. (2011). Body condition scoring as a tool for dairy herd management, extension circular 363. En: *Proceeding Manual for Body Condition Scoring* (Ed. Jones C. y Heinrichs J.), pp. 1-14. Department of Dairy and Animal Sciences Pennsylvania State University, University Park.
- García-Paloma J.A. (1990). El método de la condición corporal en vacuno lechero: propuesta de una metodología unificadora. *Investigación Agraria Producción y Sanidad Animales* 5(3): 121-130.
- Hernández-Ortega M., Martínez-Fernández A., Soldado A., González A., Arriaga-Jordán C.A., Argamentería A., de la Roza-Delgado B., Vicente F. (2014). Effect of total mixed ration composition and daily grazing pattern on milk production, composition and fatty acids profile of dairy cows. *Journal of Dairy Research* 81: 471-478. <https://doi.org/10.1017/S0022029914000399>
- Hills J.L., Wales W.J., Dunshea F.R., García S.C., Roche J.R. (2015). Invited review: An evaluation of the likely effects of individualized feeding of concentrate supplements to pasture-based dairy cows. *Journal of Dairy Science* 98: 1363-1401. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8475>
- Lamberson W.R. (2016). Letter to the editor: A response to Robinson. *Journal of Dairy Science* 99: 2437-2437. <http://doi.org/10.3168/jds.2016-10915>

- Martínez-Fernández A., de la Roza-Delgado B., Modroño S., Argamentería A. (2008). Producción y contenido en principios nutritivos de prados, praderas y de la rotación raigrás italiano-maíz en la rasa marítima centro-oriental de Asturias. *Pastos* 38(2): 187-224.
- Morales-Almaráz E., de la Roza-Delgado B., González A., Soldado A., Rodríguez M.L., Peláez M., Vicente F. (2011). Effect of feeding system on unsaturated fatty acid level in milk of dairy cow. *Renewable Agriculture and Food Systems* 26(3): 224-229. <http://doi.org/10.1017/S1742170511000019>
- Morales-Almaráz E., de la Roza-Delgado B., Soldado A., Martínez-Fernández A., González A., Domínguez-Vara I., Vicente F. (2018). Parity and grazing-time effects on milk fatty acid profile in dairy cows. *Animal Production Science* 58(7): 1175-1191. <http://doi.org/10.1071/AN15755>
- National Research Council (NRC) (2001). *Nutrient Requirements of Dairy Cattle Seventh Revised Edition*. National Academy Press, Washington, D.C.
- Nozière P., Sauvant D., Delaby L. (2018). *Alimentation des ruminants*. Inra 2018. Ed. Quae, Versailles, France. 640 pp. <http://doi.org/10.3920/978-90-8686-292-4>
- R Core Team (2013). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponible en: <http://www.R-project.org/> (abril 2023)
- Robinson P.H. (2016). Letter to editor: Comments on Journal Dairy Science statistical unit policy as it relates to pen-based animal studies. *Journal of Dairy Science* 99: 2435-2436. <http://doi.org/10.3168/jds.2015-10712>.
- de la Roza-Delgado B., Argamentería A., Martínez-Fernández A. (2007). Ingestión voluntaria y digestibilidad de forraje verde de raigrás inglés, raigrás híbrido y trébol blanco ensilado bajo forma de rotopacas o en silos horizontales. *Pastos* 37 (2): 203-227.
- de la Roza-Delgado B., Martínez-Fernández A., Modroño M.S., Argamentería A. (2022a). Pradera de *Lolium perenne* y *Trifolium repens* en Asturias. I. Evolución de la composición química y de la digestibilidad *in vivo* sobre vacas frisonas a lo largo del año. *ITEA-Información Técnica Económica Agraria* 118(1): 48-68. <https://doi.org/10.12706/itea.2021.013>
- de la Roza-Delgado B., Martínez-Fernández A., Modroño M.S., Argamentería A. (2022b). Pradera de *Lolium perenne* y *Trifolium repens* en Asturias. II. Balances nutricionales sobre vacas frisonas en producción a lo largo del año. *ITEA-Información Técnica Económica Agraria* 118(4): 530-546. <https://doi.org/10.12706/itea.2021.039>
- de la Roza-Delgado B., Martínez-Fernández A., Modroño M.S., Argamentería A., (2023). Pradera de raigrás inglés-trébol blanco (*Lolium perenne*-*Trifolium repens*) en Asturias. III. Ingestión y valor lastre en vacuno lechero. *ITEA-Información Técnica Económica Agraria*. 119(4): 357-369. <https://doi.org/10.12706/itea.2023.009>
- Sayers H.J., Mayne C.S., Bartram C.J. (2003). The effect of level and type of supplement offered to grazing dairy cows on herbage intake, animal performance and rumen fermentation characteristics. *Animal Science* 76: 439-454. <http://doi.org/10.1017/S1357729800058653>
- Wilcox R.R. (2017). *Introduction to Robust Estimation & Hypothesis Testing*. 4th edition. Elsevier. Amsterdam. The Netherlands. 608 pp
- Wood P.D.P. (1976). Algebraic models of the lactation curves for milk, fat and protein production, with estimates of seasonal variation. *Animal Production* 22: 35-40. <https://doi.org/10.1017/S000335610003539X>
- Vázquez Yáñez O.P., González Rodríguez A., López Díaz J.E. (2005). Descripción de la evolución de la altura y producción de una pradera durante el pastoreo de primavera con vacas de leche. En: *Producciones agroganaderas: gestión eficiente y conservación del medio natural* (Ed. Osoro K., Argamentería A., Larraceleta A.), pp. 191-198. Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (SERIDA), Asturias, España.

(Aceptado para publicación el 26 de agosto de 2024)

Incorporación de orujo de uva al concentrado de corderos de cebo, efecto sobre las emisiones de metano. Estudio preliminar

Carmen Barraso^{1,*}, Alfredo García¹, M. Montaña López-Parra² y Pedro L. Rodríguez³

¹ Departamento de Producción Animal, Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura (CICYTEX), 06187, Badajoz, España.

² Departamento de Calidad de Carne, Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura (CICYTEX), 06187, Badajoz, España.

³ Departamento de Producción Animal y Ciencia de los Alimentos, Facultad de Veterinaria, Universidad de Extremadura, Av. de las Ciencias s/n, 10003, Cáceres, España.

Resumen

El metano es uno de los principales gases de efecto invernadero asociado a la ganadería, en concreto a los rumiantes. El objetivo de este estudio es determinar si la incorporación del subproducto orujo de uva tinta (variedad 'Tempranillo') en la dieta de corderos de cebo, reduce las emisiones de metano, y si esta modificación repercute en los parámetros productivos y calidad del producto final. Para ello, se emplearon 12 corderos merinos, separados en dos lotes; Control (concentrado de cebo convencional) y Experimental (sustitución 5 % de cebada del concentrado por 5 % orujo de uva tinta). Se determinó diariamente la concentración de metano mediante detector láser metano portátil. Se llevó a cabo un control del consumo y peso de los animales, analizando finalmente el color, pH, humedad, oxidación lipídica, grasa intramuscular y perfil ácidos grasos del *longissimus dorsi*. Los resultados de este estudio preliminar mostraron una reducción de la concentración media de metano durante la eructación (27,77 ppm.m vs. 52,30 ppm.m) en el lote experimental, una menor frecuencia de eructación en este lote frente al control, y además, también se pudo observar una reducción de la concentración máxima de metano emitida durante la respiración y eructación (54,15 ppm.m vs. 101 ppm.m). Por su parte, los índices productivos, al igual que los parámetros de calidad de carne no se vieron alterados por la modificación en la dieta. Por tanto, la incorporación de orujo de uva tinta al 5 % en el concentrado de cebo de corderos podría tener un efecto positivo sobre el impacto medioambiental, sin otras repercusiones negativas, sin embargo, es necesario ampliar el periodo de estudio, así como el número de animales para llegar a unas conclusiones más robustas.

Palabras clave: Subproducto, nutrición, gases de efecto invernadero, economía verde y circular, rumiantes, calidad de carne.

* Autor para correspondencia: carmen.barraso@juntaex.es

Cita del artículo: Barraso C., García A., López-Parra M.M., Rodríguez P.L. (2024). Incorporación de orujo de uva al concentrado de corderos de cebo, efecto sobre las emisiones de metano. Estudio preliminar. ITEA-Información Técnica Económica Agraria 120(4): 380-396. <https://doi.org/10.12706/itea.2024.011>



Effect of grape pomace on methane emissions in fattening lambs. Preliminary study

Abstract

Methane is an important greenhouse gas associated with livestock, especially ruminants. The aim of this study was to evaluate whether the addition of red grape pomace by-product ('Tempranillo' variety) to the diet of fattening lambs reduces methane emissions and to verify whether this dietary modification influences the production and quality parameters of the final product. Twelve Merino lambs divided in two batches were used: control (conventional feed concentrate) and experimental (substitution of 5 % barley concentrate by 5 % red grape pomace). Daily methane concentrations were determined using a portable laser methane detector. On the other hand, the consumption and weight of the animals were monitored. Finally, the colour, pH, moisture, lipid oxidation, intramuscular fat, and fatty acid profile of the *longissimus dorsi* were analyzed. The results showed a decrease in the mean methane concentration during eructation (27.77 ppm.m vs. 52.30 ppm.m) in the experimental batch, a lower frequency of eructation in this batch compared to the control, and a reduction in the maximum methane emitted during respiration and eructation (54.15 ppm.m vs. 101 ppm.m) could also be observed. The production parameters, as well as the meat quality parameters were not altered by the diet modification, therefore, the incorporation of 5 % red grape pomace in the concentrate for fattening lambs has a positive effect on the environmental impact, with no other negative repercussions. However, it is necessary to extend the study period as well as the number of animals to obtain more consistent conclusions.

Keywords: By-product, nutrition, greenhouse gases, circular economy, ruminants, meat quality.

Introducción

Uno de los principales retos a los que se enfrenta el sector agroganadero, además de producir alimentos seguros y de alta calidad, es conseguir una producción más eficiente y respetuosa con el medio ambiente, lo cual, se traduce en una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y una mayor eficiencia de la conversión alimentaria.

Los rumiantes, debido a las características que presenta su sistema digestivo, generan metano (CH_4) como producto de la fermentación ruminal. Este GEI, además de la repercusiones medioambientales que ocasiona, también supone una pérdida entre un 10-12 % de la energía bruta aportada por la dieta (Moumen et al., 2016). Por tanto, reducir las emisiones de CH_4 ruminal es uno de los objetivos futuros del sector.

Entre las numerosas estrategias planteadas para conseguir reducir la huella medioambiental del ganado rumiante, ha despertado gran interés el uso de subproductos agroin-

dustriales como parte de la dieta, ya que, además de reducir los costes de alimentación, estos subproductos presentan compuestos orgánicos como los taninos, capaces de mejorar la calidad de los productos finales, reducir la metanogénesis y mejorar los índices productivos. Entre los diferentes subproductos generados por la agroindustria, el orujo de uva (compuesto por pulpa, hollejo y granilla en proporciones variables), presenta un alto contenido en compuesto polifenólicos que lo hacen susceptible de ser utilizado en la dieta de rumiantes para reducir las emisiones de CH_4 ruminal.

Se han desarrollado varios métodos para cuantificar las emisiones de CH_4 de los rumiantes, como la cámara de respiración de circuito abierto, técnica de trazador con hexafluoruro de azufre, GreenFeed, método Sniffer, etc., (Tedeschi et al., 2022) todos ellos, presentan una serie de ventajas e inconvenientes en cuanto a mano de obra, repetitividad, costes, rendimientos y cambios en el comportamiento animal. Otra técnica que

viene desarrollándose hace años es el uso del detector láser metano (LMD) portátil (Chagunda *et al.*, 2009). Este equipo, permite conocer la emisión de CH_4 a tiempo real en animales sin alterar su comportamiento. El LMD se ha aplicado en estudios sobre eficiencia alimentaria, genética y nutrición (Kobayashi *et al.*, 2021), principalmente en ganado vacuno lechero, pero también se ha aplicado esta técnica en pequeños rumiantes (Ricci *et al.*, 2014; Kobayashi *et al.*, 2021).

El objetivo que plantea este estudio es determinar si la reformulación de concentrado de cebo de corderos con orujo de uva tinta, repercute sobre la actividad metanogénica ruminal, así como, evaluar los posibles efectos sobre los índices productivos y la calidad del producto final.

Material y métodos

El estudio se llevó a cabo en las instalaciones de la Finca la Orden, CICYTEX (Badajoz, Extremadura). Todos los procedimientos llevados a cabo en este ensayo fueron aprobados por el comité ético de la Universidad de Extremadura, siendo considerado como práctica zootécnica habitual. Para ello, se emplearon 12 corderos machos de raza Merina nacidos en la misma semana y destetados a los 45 días de vida, desparasitados, vacunados de enterotoxemia y adaptados a comer concentrado y fibra larga. El ensayo se llevó a cabo al final del periodo de cebo por dos razones principales, la disponibilidad limitada de animales y el periodo de adaptación. Los corderos, con un peso vivo medio de 25 kg y 75 días de vida, fueron distribuidos aleatoriamente en dos lotes: lote control (LC; $n = 6$) y lote experimental (LO; $n = 6$), ubicándose en corrales individuales y consecutivos para cada uno de los lotes. El periodo de adaptación se desarrolló a lo largo de 12 días, de tal modo que: los tres

primeros días se consideraron como periodo adaptativo a las instalaciones; los cinco días consecutivos, se incorporó el concentrado de estudio de manera paulatina a razón de 300 g/animal·día; finalmente, se determinaron cuatro días de consumo completo de concentrado de estudio. Una vez transcurridos estos 12 días de adaptación, se iniciaron las mediciones de CH_4 , durante un periodo total de 5 días consecutivos.

Concentrados: composición y análisis químico

Durante el tiempo de estudio, los corderos estuvieron bajo un régimen de alimentación *ad libitum*, como es la práctica habitual de manejo en cebadero, además disponían de paja y agua potable. Los animales pertenecientes a LC recibieron un concentrado de cebo convencional, mientras que LO recibió un concentrado similar, en el que se sustituyó un 5 % de cebada por orujo desecado de uva tinta, variedad 'Tempranillo'.

Tanto la variedad de orujo, como el porcentaje de incorporación al concentrado, se determinó en base a resultados previos llevados a cabo por nuestro equipo (Barraso *et al.*, 2021a y 2021b).

El subproducto fue aportado por una bodega local. Una vez recibido, fue desecado en una estufa de ventilación forzada (Indelab-DIL FI720) a 65 °C, para su conservación y posterior utilización.

Ambos concentrados fueron analizados en función del Reglamento Europeo (Reglamento (CE) n° 152/2009), cuyos resultados se expresan en la Tabla 1. Por otro lado, la concentración de taninos condensados del subproducto fue aportada por el laboratorio de la bodega que suministró la materia prima, sin embargo, no se analizó su contenido en el concentrado de estudio.

Tabla 1. Ingredientes y valor nutricional de los concentrados del estudio.
Table 1. Ingredients and nutritional value of the study concentrates.

	Concentrados del estudio		
	Control	Experimental	Orujo
Ingredientes			
Cebada 2c	35	30	
Maíz Nacional	22,77	22,77	
Harina Soja 47 %	11,3	11,3	
Trigo Blando	10	10	
Salvado de Trigo	10	10	
DDGS Maíz+	7	7	
Orujo de Uva Tinta	0	5	
Jabón de Calcio	1,56	1,56	
Sal Terrestre	0,5	0,5	
LignoBond® ⁽¹⁾	0,5	0,5	
Karimix Ovino® ⁽²⁾	0,4	0,4	
Cloruro amónico	0,2	0,2	
Valor nutricional			
Cenizas (%)	4,67	5,04	9,71
Materia seca (%)	88,15	88,89	47,54
Proteína bruta (%)	15	15	11,81
Grasa bruta (%)	4,18	4,14	10,42
Fibra bruta (%)	4,37	5,45	25,84
Fibra neutro detergente (%)	15,57	16,23	53,73
Fibra ácido detergente (%)	5,43	5,7	48,05
Taninos condensados (mg catequina/g orujo)			104,53

DDGS: granos secos de destilería solubles. ⁽¹⁾Según marca registrada y comercializada por Borregaard, Sarpsborg, Noruega. Aglutinante, 100 % lignosulfonatos. ⁽²⁾Según marca registrada y comercializada por Laboratorios KARIZOO, Barcelona, España. Corrector vitamínico-mineral (por kg de concentrado): Vitamina A, 10.000 U.I; Vitamina D3, 3000 U.I; Vitamina E, 20 mg; Cobalto, 0,3 mg; Hierro, 20 mg; Molibdeno, 2 mg; Zinc, 80 mg; Manganeso, 40 mg; Selenio, 0,45 mg; Yodo, 0,5 mg.

Índices productivos

En cuanto a los índices productivos, se tuvieron en cuenta solamente durante la semana de estudio por dos razones principales: en primer lugar, los animales se encontraban en la última fase de cebo, de tal modo, una vez finalizado el ensayo fueron destinados a sacrificio. Por otro lado, en las semanas previas, los animales estuvieron en fase de adaptación al pienso experimental, sin consumirlo en su totalidad. Como índices productivos se determinaron; ganancia media diaria (GMD) e índice de conversión (IC), para ello, se llevó a cabo un control diario de la cantidad de concentrado ofertado y rehusado, pesados ambos con un dinamómetro digital UCM50. Estas determinaciones nos permitieron calcular la ingesta voluntaria del concentrado (IVC). Los corderos fueron pesados semanalmente mediante una báscula ganadera digital con 100 g de precisión (Digi-Star).

Medición de CH₄ con LMD: método y preparación de datos

La medición de CH₄ se llevó a cabo con un LMD portátil (LaserMethane mini SA3C32A, Tokyo Gas Engineering Co. Ltd., Tokio, Japón). Este equipo mide la concentración de CH₄ (ppm.m) presente en el aire, entre el objetivo de medición y el detector. Su función se basa en la espectroscopia de absorción infrarroja, a través de un láser semiconductor con un puntero indicador que permite enfocar el equipo hacia el punto o espacio concreto donde queremos medir. La longitud de onda de la fuente se fija en la línea de absorción del CH₄ (1,6537 μm), lo cual, proporciona una gran precisión y evita interferencias con otros gases.

Las mediciones CH₄ se realizaron diariamente (1 medición/animal-día), transcurridas dos horas desde la oferta de la ración (10:00 h), durante un periodo total de 5 días. La distancia de medición entre el LMD y la zona nasal del animal fue de 1 m y el tiempo de medición

3 min (durante este tiempo los animales fueron inmovilizados por un operario). El LMD registra puntos de concentración a intervalos de 0,5 s, obteniendo un total de 360 medidas por animal y día. Todos los datos se almacenaron en un dispositivo Android conectado al LMD mediante Bluetooth.

Teniendo en cuenta que los rumiantes liberan CH₄ por dos vías principales: 1) Exhalado a través de los pulmones y 2) Emitido directamente desde el rumen a través de la eructación (Murray et al, 1976), ambos eventos son detectados por el LMD y representados con diferentes alturas en los picos de la gráfica como puede observarse en el Figura 1. El perfil de emisión de CH₄ representa pequeños aumentos de concentración de CH₄, “minipicos” (representados en el Figura 1 como puntos sólidos) debidos a la exhalación o eructación. Antes y después de un “minipico”, los “minivalles” (puntos blancos) representan pequeñas disminuciones de la concentración de CH₄ debidas a la difusión.

Sólo los datos de los “minipicos” se seleccionan para el cálculo de las variables. Esta selección se realizó mediante la programación de una MacroExcel siguiendo el procedimiento descrito por Sorg et al. (2018).

Para definir el umbral entre respiración y eructación, se aplicó el método boxplot, calculando para cada perfil el primer cuartil (Q1) y tercer cuartil (Q3) de todos los valores de CH₄. Con este método, puede clasificarse un valor como “atípico” si supera el umbral T, definido este umbral por la siguiente ecuación:

$$T = Q3 + (1,5 \times IQR) \quad [1]$$

siendo IQR la diferencia entre Q3-Q1 (Meinert y Norman, 1998).

La presencia de dos o más valores “atípicos” consecutivos, se consideraron como eventos de eructación. Los eventos de eructación registrados por el LMD fueron a su vez constatados por las observaciones realizadas durante la medición.

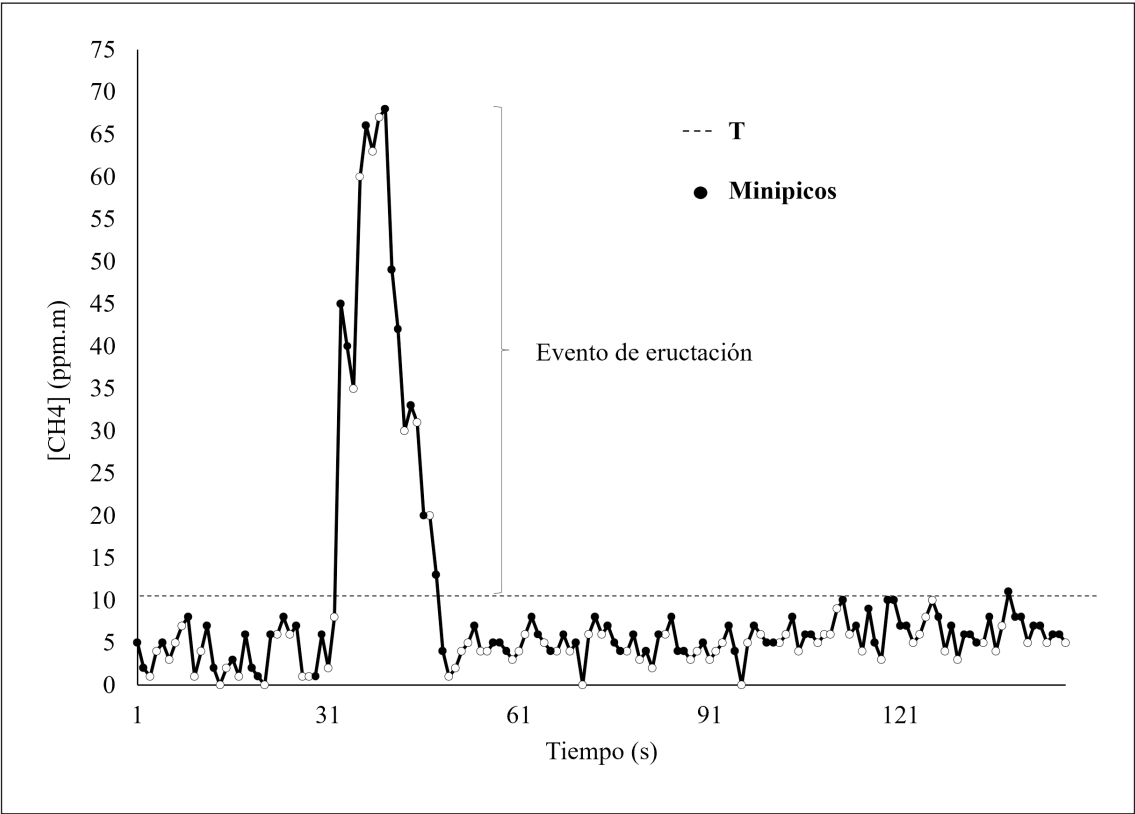


Figura 1. Perfil de la concentración de CH₄ en el aliento de un cordero de cebo medido con el detector láser de metano. El umbral (T) separa los valores de eructación y respiración y se calcula como $T = Q3 + (1,5 \times (Q3 - Q1))$, siendo Q1 y Q3 el primer y tercer cuartil de la distribución de todos los valores de CH₄ en un perfil.
Figure 1. Profile of the CH₄ concentration in the breath of a fattening lamb measured with the laser methane detector. The threshold (T) separates belching and breathing values and is calculated as $T = Q3 + (1,5 \times (Q3 - Q1))$, where Q1 and Q3 are the first and third quartiles of the distribution of all CH₄ values in a profile.

Las variables estimadas a partir de la base de datos obtenidos fueron las siguientes:

- CH₄e+r: concentración media (ppm.m) de CH₄ durante la respiración y eructación.
- CH₄max: concentración máxima (ppm.m) de CH₄ durante la respiración y eructación.
- CH₄r: concentración media (ppm.m) de CH₄ durante la respiración.

- CH₄rmax: concentración máxima (ppm.m) de CH₄ durante la respiración.
- CH₄e: concentración media (ppm.m) de CH₄ durante la eructación.
- CH₄emax: concentración máxima (ppm.m) de CH₄ durante la eructación.
- N° e: número de eventos de eructación registrados y observados por animal/día.

Análisis de carne

Los corderos fueron sacrificados con un peso medio de 28 kg. Trascurridas 24 h del sacrificio, se tomaron muestras del músculo *longissimus dorsi*, donde se llevaron a cabo las diferentes determinaciones analíticas.

pH y color instrumental

El pH se midió con un pH-metro digital (modelo HI98163, Hanna instruments, Rhode Island, USA) equipado con un electrodo de penetración. El color se determinó mediante un colorímetro MINOLTA CR-400 (Minolta Camera, Osaka, Japón) con el iluminante D65 un observador estándar de 0 ° y un puerto/área de visión de 2,5 cm. Los parámetros obtenidos en el espacio CIE Lab fueron la luminosidad (L^*), índice de rojo (a^*) e índice de amarillo (b^*).

Oxidación lipídica

Se evaluó mediante las sustancias reactivas del ácido tiobarbitúrico (TBA-RS). Los valores se calcularon a partir de la curva estándar (1,1,1,3-tetraetoxipropano, TEP) y se expresaron como mg de malondialdehído por kg de muestra (mg MDA kg^{-1}).

Humedad

El contenido en humedad se determinó según el método de la AOAC (AOAC, 2023). Los resultados se expresaron en g/100 g de la muestra como valores medios.

Grasa intramuscular y perfil de ácidos grasos

El contenido total de grasa se identificó mediante el método de Folch et al. (1957) utilizando cloroformo/metanol (2:1 v/v). El resultado se expresó como g/100 g de muestra. Los metilesteres de ácidos grasos (FAMES) se analizaron utilizando un cromatógrafo de gases Agilent 6890 (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, EE.UU.), equipado con un

detector de ionización de llama (FID) y columna Capilar DB-23 (Agilent Technologies, 60 m $\times$ 0,25 mm ID, 0,25 μm film), siguiendo la metodología de (Trejo et al., 2021). Los resultados se expresan como porcentaje del total de metilésteres de ácidos grasos.

Análisis estadístico

Para evaluar el posible efecto de la incorporación de un 5 % de orujo de uva tinta en el concentrado de cebo, se aplicaron diferentes análisis estadísticos en función de la naturaleza de las variables. Las variables correspondientes a la concentración de CH_4 , fueron evaluadas mediante un análisis de varianza de medidas repetidas con factor intersujeto. La frecuencia de eructación se determinó mediante un análisis descriptivo de frecuencias, aplicando un análisis chi-cuadrado. En cuanto a las variables de índices productivos y calidad de la carne, se analizaron mediante un análisis de la varianza. Todos los datos se analizaron con el paquete estadístico SPSS versión 29.0 (IBM SPSS Statistics).

Resultados y discusión

Metano

Los datos obtenidos del control seriado de las emisiones de CH_4 , fueron segregados en función de su procedencia (respiración o eructación). Esta diferenciación también la han realizado otros autores como Ricci et al. (2014) y Reintke et al. (2020). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2. En cuanto a la concentración de CH_4 en su conjunto (respiración + eructación), los datos muestran una diferencia significativa ($p < 0,05$) en la concentración máxima de CH_4 (CH_4max) emitida, siendo un 46,39 % superior en el caso de LC, sin embargo, este efecto no se observa en la concentración media ($\text{CH}_4\text{e+r}$).

Tabla 2. Media y concentración máxima de CH₄ (ppm.m) calculados a partir de los datos de salida del detector LMD (respiración, eructación y respiración + eructación).
Table 2. Mean and maximum CH₄ concentration (ppm.m) calculated from the LMD detector output data (respiration, eructation and respiration + eructation).

	LC	LO	EEM	<i>p</i>
	Media	Media		
Respiración+eructación				
CH ₄ e+r	9,99	8,53	1,401	0,311
CH ₄ max	101,00	54,15	14,592	0,018
Respiración				
CH ₄ r	6,61	6,13	0,173	0,170
CH ₄ rmax	14,83	13,13	1,410	0,047
Eructación				
CH ₄ e	52,30	27,77	9,611	0,032
CH _{4e} max	110,05	55,04	18,091	0,019

CH₄e+r: concentración media de CH₄ durante la respiración y eructación; CH₄max: concentración máxima de CH₄ durante la respiración y eructación; CH₄r: concentración media de CH₄ durante la respiración; CH₄rmax: concentración máxima de CH₄ durante la respiración; CH₄e: concentración media de CH₄ durante la eructación; CH₄e max: concentración máxima de CH₄ durante la eructación; LC: lote control; LO: lote experimental; EEM: error estándar de la media; p: p-valor.

Un efecto similar se observa en la respiración, donde la concentración máxima (CH₄rmax) fue significativamente inferior ($p < 0,05$) en el caso de LO, mientras que la concentración media (CH₄r) fue similar en ambos lotes. Por otro lado, la concentración media de CH₄ eructado (CH₄e) mostró una marcada diferencia ($p < 0,05$) entre ambos lotes, de nuevo, es el LO el que presenta una menor concentración (27,77 ppm.m) frente a LC (52,30 ppm.m). En cuanto a la concentración máxima de CH₄ (CH₄e max), muestra un patrón similar al obtenido en los casos anteriormente descritos, siendo inferior ($p < 0,05$) en LO que en LC.

Estos resultados evidenciarían una reducción en la producción de CH₄ ruminal asociado al concentrado reformulado con orujo de uva, siendo más notable en el proceso de eructación.

El orujo de uva es un subproducto rico en taninos, de manera que el efecto reductor de la actividad metanogénica observado podría deberse a la capacidad antimicrobiana que presentan estos compuestos, que actúan interviniendo en procesos vitales, tales como, la quelación de metales o la afectación de la integridad de la pared y membrana celular, inhibiendo el transporte de nutrientes y dificultando el crecimiento bacteriano, y por tanto, reduciendo la actividad metanogénica (Patra y Saxena, 2010).

Esta hipótesis ha sido avalada por numerosos ensayos tanto a nivel *in vitro* como *in vivo*. Estudios *in vitro* llevados a cabo por nuestro equipo (Barraso et al., 2021b), mostraron un efecto reductor de la producción de gas y CH₄ en mezclas de cebada con diferentes con-

centraciones de orujo de uva tinta. Del mismo modo, Gomaa *et al.* (2017) encontraron diferencias en la producción de CH_4 al incorporar plantas taníferas en diferentes concentraciones, obteniendo los mejores resultados con las tasas más altas (30 % de la dieta ofertada). Hatew *et al.* (2016) también obtuvieron una reducción lineal entre la producción de CH_4 y el nivel de taninos analizados. Referente a los estudios *in vivo*, Moate *et al.* (2014) demostraron un efecto reductor entre el 20-24 % de las emisiones de CH_4 en vacuno al sustituir el 36 % del heno de alfalfa por subproductos de la uva. Por otro lado, en un meta análisis llevado a cabo por Orzuna-Orzuna *et al.* (2021) concluyó que los taninos reducen las emisiones entéricas de CH_4 en el ganado vacuno, principalmente cuando se suministran como parte de la dieta. En nuestro caso, la concentración de taninos condensados presentes en el subproducto fue de 104,53 mg cat/g de orujo.

En cuanto al uso del LMD para realizar mediciones de CH_4 a tiempo real en animales rumiantes, actualmente no existe un protocolo de medición estandarizado, y su principal aplicación ha sido en vacuno lechero, siendo escasos los trabajos publicados de su uso en ganado ovino. Con una metodología similar a la nuestra, Ricci *et al.* (2014) determinó la concentración de CH_4 en ovejas con diferentes tratamientos nutricionales, indicando unos valores de concentración media y máxima de respiración acordes a los del presente estudio, mientras que los valores obtenidos para la eructación fueron superiores. También fueron superiores los descritos por Reintke *et al.* (2020) en ovejas adultas. Las diferencias encontradas con los datos publicados por estos autores, posiblemente se deban a la diferencia de edad de los animales, ya que al tratarse de ovinos adultos, presentan un mayor desarrollo fisiológico del rumen, lo cual conlleva a una mayor capacidad de ingestión y, por ende, mayor producción de gas y CH_4 ruminal (Liu *et al.*, 2017).

En cuanto a la frecuencia de eructación, los datos obtenidos se recogen en el Figura 2. Podemos observar una marcada diferencia entre LC y LO ($p < 0,001$), siendo mayor la frecuencia observada en el caso del LC. De tal modo que, del total de las observaciones realizadas a lo largo del periodo de estudio, el LC registró 3 eventos de eructación en el 20 % de los casos, siendo inexistente este comportamiento en LO. En el otro extremo (0 eventos de eructación), encontramos LO con una frecuencia del 50 % de total de las observaciones, frente a LC con 23 %. Estas diferencias, podrían explicarse por la formación de complejos tanino-carbohidratos y tanino-proteínas (LO), que disminuyen la disponibilidad de sustrato fermentable para los microorganismos ruminales, dando lugar a una menor producción de gas ruminal y, por ende, una menor frecuencia de eructación (Patra y Saxena, 2010).

Por otro lado, los microorganismos ruminales tienen la capacidad de adaptarse de manera progresiva a las modificaciones dietéticas, así como, a diferentes sustancias funcionales, lo cual, pone en duda la estrategia planteada en este estudio, ya que, a largo plazo podría verse mermada la actividad antimetanogénica asociada a los taninos. En lo que respecta a los resultados de nuestro ensayo, la concentración de CH_4 se mantuvo constante ($p > 0,05$) durante los 5 días de estudio para LO (Figura 3). Autores como Salami *et al.* (2018) encontraron un efecto prologado en el tiempo de la población metanógena en corderos de cebo alimentados con diferentes fuentes de taninos, lo que coincide con lo indicado por autores como Staerfl *et al.* (2012) en bovinos o Torres *et al.* (2023) en ovinos. Sin embargo, otros trabajos no encuentran un efecto de la incorporación de taninos sobre la producción de CH_4 (Wischer *et al.*, 2014), lo que demuestra la importancia del tipo de tanino y su concentración sobre el efecto mitigador.

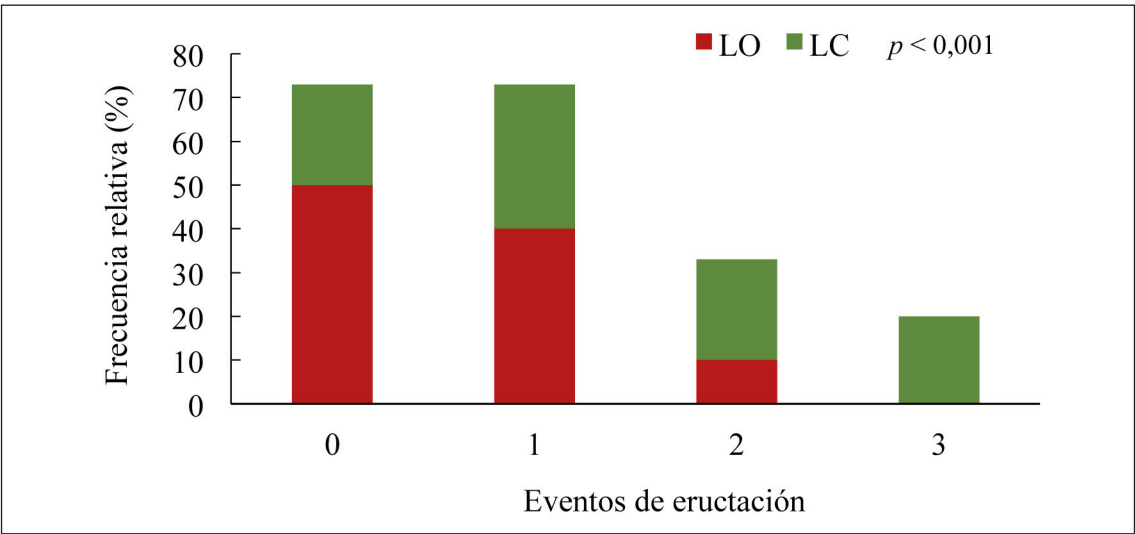
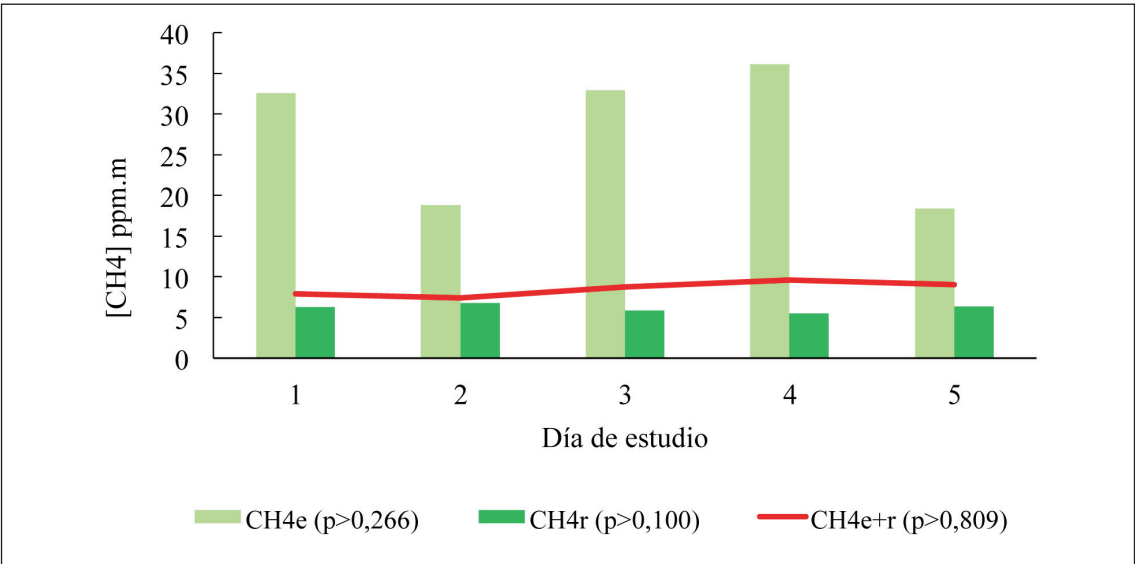


Figura 2. Frecuencia de eructación del lote control (LC) y lote experimental (LO) observados y registrados por el detector láser de metano.
Figure 2. Frequency of eructation of the control batch (LC) and experimental batch (LO) observed and detected by the laser methane detector.



CH₄e: concentración media de CH₄ durante la eructación; CH₄r: concentración media de CH₄ durante la respiración; CH₄e+r: concentración media de CH₄ durante la respiración y eructación; p: p-valor.
Figura 3. Evolución de las emisiones de CH₄ registrada por el lote experimental (LO) a lo largo del periodo de estudio (5 días).
Figure 3. Evolution of CH₄ emission during the study time (5 days) recorded by the experimental batch (LO).

Índices productivos

La GMD junto con el IC, son los parámetros más utilizados para evaluar la respuesta productiva en cordero de cebo. Varios estudios han demostrado que la suplementación dietética con taninos mejora la eficiencia de utilización del alimento repercutiendo en los índices productivos, sin embargo, este efecto no se ve reflejado en nuestros resultados, al no encontrar diferencias entre LC y LO en cuanto a IC y GMD (Tabla 3), lo cual, podría deberse al escaso tiempo de suplementación.

En el caso de GMD, los valores obtenidos fueron inferiores a los publicados por el Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación (300 g/animal·día) propios de la raza Merina (MAPA, 2023), sin embargo, la GMD de los corderos pertenecientes a LO, coinciden con los publicados por Forero et al. (2017) y Agudo (2020), en corderos merinos de cebo. Respecto al IC, ambos lotes se encuentran en el rango promedio descrito para esta raza (Bello et al., 2013; Agudo, 2020). Por lo tanto, el rendimiento productivo es completamente normal en ambos lotes de corderos.

Tabla 3. Índices productivos de corderos merinos en periodo de cebo.
Table 3. Productive indexes of Merino lambs in fattening period.

	LC	LO	EEM	p
	Media	Media		
IVC	977	925	95,239	0,790
GMD	0,18	0,23	0,032	0,426
IC	3,26	3,20	0,537	0,938

IVC: ingestión voluntaria de concentrado (g/animal·día); GMD: ganancia media diaria (kg/animal·día); IC: índice de conversión; LC: lote control; LO: lote experimental; EEM: error estándar de la media; p: p-valor.

Por otro lado, se ha planteado la hipótesis que la presencia de taninos pueda afectar de manera negativa a la ingesta de alimento (IVC), debido a la naturaleza astringente que presentan estos compuestos (Tedeschi et al., 2021). Los resultados obtenidos indican que existe una buena aceptación del concentrado experimental (Tabla 3), al no encontrar diferencias ($p > 0,05$) en la IVC entre LO y LC, posiblemente debido a la baja concentración de taninos aportados en la dieta (104,53 mg cat/g de orujo), ya que estos efectos negativos se han descrito a dosis superiores (50 g/kg MS) (Naumann et al., 2017). De manera similar a estos resultados, Méndez-Ortiz et al. (2018) no encontraron un efecto significativo sobre la in-

gesta de alimento en corderos suplementados con taninos. Aun así, los valores de consumo están dentro del rango publicado por Bello et al. (2013) y superiores a los publicados por Agudo (2020) en corderos Merino de cebo.

Estudio de calidad del producto final

Los resultados relacionados con el estudio físico químico de la carne se indican en la Tabla 4. Los valores de pH muscular no presentaron diferencias estadísticas ($p > 0,05$) entre los tratamientos experimentales, oscilando entre 5,4 y 5,5. Otros autores encontraron valores próximos a éstos en la misma raza (Tejeda et al., 2008; Gutiérrez et al., 2011). En todo ca-

Tabla 4. Parámetros de pH, color, humedad, grasa intramuscular y oxidación lipídica en *longissimus dorsi* de cordero Merino.
Table 4. Parameters of pH, color, moisture, intramuscular fat and lipid oxidation in *longissimus dorsi* of Merino lamb.

	LC	LO	EEM	p
	Media	Media		
pH	5,44	5,46	0,019	0,758
L*	33,30	32,25	0,641	0,437
a*	13,62	13,51	0,360	0,879
b*	2,48	2,32	0,173	0,671
Humedad	75,83	75,05	0,266	0,149
G.I.M	2,03	2,54	0,192	0,192
Ox. Lipídica	0,06	0,06	0,043	0,887

L*: luminosidad; a*: índice de rojo; b*: índice de amarillo; G.I.M: grasa intramuscular expresada en %; Ox. Lipídica: oxidación lipídica expresada en mg MDA kg⁻¹; LC: lote control; LO: lote experimental; EEM: error estándar de la media; p: p-valor.

so se trata de valores dentro del rango normal y siempre por debajo de 5,8 (considerados estos como no deseables). Los resultados de este experimento concuerdan con los indicados por otros autores, que tampoco encontraron efecto sobre el pH muscular al incluir diversas fuentes de polifenoles (Morán et al., 2012) en dietas de cordero.

El color de la carne, descrito por las coordenadas L* a* b* (luminosidad, índice de rojo e índice de amarillo) presenta valores próximos a los indicados por Tejeda et al. (2008) y bastante más elevados a los indicados por Gutiérrez et al. (2011). No se muestra efecto significativo asociado al tipo de acabado ($p > 0,05$). Pese a que algunos autores han observado que la inclusión dietética de compuestos fenólicos produce carne con menores índices de luminosidad, al ser agentes quelantes del hierro que promueven una menor concentración de hemoglobina en sangre y probablemente una menor concentración de mioglobina antes del sacrificio (Samman et al.,

2001), los valores obtenidos no concuerdan con esta observación, pero sí con otros autores (Andrés et al., 2013; Guerra-Rivas, 2015) quienes no encontraron diferencias estadísticamente significativas en los valores de L* en carne de cordero.

La suplementación con orujo no afectó el valor de a*, lo que coincide con varios autores (Andrés et al., 2013; Guerra-Rivas, 2015), quienes tampoco encontraron diferencias estadísticamente significativas de este índice en carne de corderos suplementados con diferentes fuentes naturales de polifenoles en comparación con un grupo control.

En cuanto a los resultados relacionados con la humedad y porcentaje de grasa intramuscular tampoco hay diferencias reseñables ($p > 0,05$) entre los dos lotes de corderos estudiados. Los valores de humedad son similares a los descritos por Tejeda et al. (2008) mientras que los del contenido en grasa intramuscular son algo más elevados, sin establecerse tam-

poco diferencias entre lotes pese a que el porcentaje en LO fueron algo más elevados (2,54 vs. 2,03).

Las concentraciones de TBARS no fueron significativamente diferentes entre los dos tratamientos, con valores de 0,06 mg de MDA kg⁻¹ muscular. La ausencia de diferencias significativas en este estudio podría deberse a las dosis empleadas o el momento del muestreo, ya que sería más indicado observar la evolución de este parámetro durante un periodo de conservación de la carne más prolongado, del mismo modo, también podría

deberse al corto periodo de suplementación. En este sentido Jerónimo *et al.* (2012) indicaron que la inclusión de diferentes fuentes de polifenoles en la dieta de los corderos, incluido el extracto de semilla de uva, redujo la oxidación de los lípidos de la carne durante el almacenamiento.

En la Tabla 5, se recogen los datos relativos a la composición de los ácidos grasos de la grasa intramuscular, expresada como porcentaje, determinándose como ácidos mayoritarios el oleico, palmítico y esteárico (C18:1, C16:0 y C18:0). Aunque en los corderos el perfil de

Tabla 5. Perfil de ácidos grasos del músculo *longissimus dorsi* de corderos merinos.
Table 5. Fatty acid profile of the *longissimus dorsi* muscle of Merino lambs.

	LC	LO	EEM	p
	Media	Media		
C12:0	0,15	0,23	0,021	0,066
C14:0	2,37	2,91	0,183	0,144
C16:0	24,83	24,34	0,311	0,472
C16:1	2,33	2,43	0,107	0,684
C17:0	0,95	1,17	0,047	0,009
C17:1	0,52	0,63	0,031	0,075
C18:0	15,88	15,31	0,544	0,621
C18:1	45,58	45,32	0,520	0,816
C18:2, cis,cis	6,77	6,93	0,269	0,791
C18:3	0,51	0,58	0,035	0,340
C20:0	0,02	0,05	0,015	0,352
C20:1	0,09	0,09	0,006	0,669
AGS	44,20	44,02	0,387	0,838
MUFA	48,52	48,47	0,588	0,962
PUFA	7,28	7,51	0,282	0,713

C12:0: ácido láurico; C14:0: ácido mirístico; C16:0: ácido palmítico; C16:1: ácido palmitoleico; C17:0: ácido margárico; C17:1: ácido margaroleico; C18:0: ácido esteárico; C18:1: ácido oleico; C18:2,cis,cis: linoleico; C18:3: ácido linolénico; C20:0: ácido aráquico; C20:1: ácido gadoleico; AGS: ácidos grasos saturados; MUFA: ácidos grasos monoinsaturados; PUFA: ácidos grasos poliinsaturados; LC: lote control; LO: lote experimental; EEM: error estándar de la media; p: p-valor.

ácidos grasos puede modificarse en función del alimento consumido (Velasco *et al.*, 2001) en este estudio no se apreciaron diferencias entre los lotes experimentales ($p > 0,05$), a diferencia de Guerra-Rivas, (2015) que detectaron una tendencia a un mayor contenido en ácidos grasos poliinsaturados en la carne de los corderos que recibieron orujo de uva. La única diferencia encontrada es el mayor valor del ácido margárico (C17:0) ($p < 0,01$) en LO. En todo caso, el resultado implicaría que el efecto sobre la producción de CH_4 no parece alterar severamente el equilibrio de la microbiota ruminal, no habiendo repercusión sobre el perfil de ácidos grasos generado.

Conclusiones

Teniendo en cuenta las limitaciones que presenta este estudio preliminar al tratarse de un número pequeño de animales y un corto periodo de suplementación, las conclusiones que se obtienen son: que la incorporación de orujo de uva en concentrado de cebo de corderos disminuye la concentración de CH_4 máxima exhalada, así como, la emitida durante la eructación, sin alterar los índices productivos ni repercutir en la calidad del producto final. Por tanto, el uso de este subproducto como parte de la dieta de cebo de corderos podría ser una alternativa sostenible para reducir la huella de carbono en la producción de corderos. Sin embargo, sería necesario llevar a cabo investigaciones futuras con un mayor número de animales y durante el periodo de cebo completo, para determinar la efectividad del subproducto en todos sus niveles.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto COPLAGAN de I+D+i a desarrollado en el marco del programa operativo FEDER EXTREMADURA 2014-2020. Agradecemos al

personal de campo de CICYTEX y al personal del laboratorio de la UEX, por su inestimable colaboración en la realización de las tareas determinadas en este estudio.

Referencias bibliográficas

- Agudo F. (2020). El cebo de corderos sin paja como alternativa al cebo tradicional: estudio técnico y económico. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba. Córdoba, España.
- Andrés S., Tejido M.L., Bodas R., Morán L., Prieto N., Blanco C., Giráldez F.J. (2013). Quercetin dietary supplementation of fattening lambs at 0.2% rate reduces discolouration and microbial growth in meat during refrigerated storage. *Meat Science* 93: 207-212. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.08.023>
- AOAC (2003). Official Methods of Analysis of the Association of Official's Analytical Chemists, 17th. Ed. AOAC International.
- Barraso C., López-Parra M.M., Rodríguez P.L. (2021a). Efecto de la variedad de orujo de uva sobre la producción de gas y metano in vitro. *Archivos de Zootecnia* 70: 34-40. <https://doi.org/10.21071/az.v70i269.5416>
- Barraso C., López-Parra M.M., Rodríguez P.L. (2021b). Effect of Grape pomace incorporation on fermentative characteristics of a concentrate. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences* 10: 69-79. <https://doi.org/10.15640/jaes.v10n1a9>
- Bello J.M., Arroyo G., Lavín P., Mantecón Á.R. (2013). Variaciones en la respuesta productiva de corderos en cebo en condiciones prácticas de explotación: Efecto del peso vivo, sexo, genotipo y época. XXXVIII congreso nacional y XIV internacional de la Sociedad Española De Ovinotecnia y Caprinotecnia, 18-20 de septiembre, Málaga, España, pp. 635-641.
- Chagunda M.G.G., Ross D., Roberts D.J. (2009). On the use of a laser methane detector in dairy cows. *Computers and Electronics in Agriculture* 68: 157-160. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.05.008>

- Folch J., Lees M., Sloane Stanley G.H. (1957). A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues. *Journal Biochemistry* 226: 497-509.
- Forero F.J., Venegas M., Alcalde M.J., Daza A. (2017). Peso al nacimiento y al destete y crecimiento de corderos Merinos y cruzados con Merino Precoz y Ile de France. Análisis de algunos factores de variación. *Archivos de Zootecnia* 66: 89-9. <https://doi.org/10.21071/az.v66i253.2130>
- Gomaa R.M.M., González-Ronquillo M., Arredondo-Ramos J., Molina L.T., Castelán-Ortega O.A., (2017). Effect of tanniferous plants on *in vitro* digestion and methane production. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 4: 371-380. <https://doi.org/10.19136/era.a4n11.1160>
- Guerra-Rivas C.M. (2015). Empleo de orujo de uva en la alimentación del ganado ovino. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid. <https://doi.org/10.35376/10324/15433>
- Gutiérrez J.I., Tejeda J.F., Carrapiso A.I., Petró M.J., Lara M.S., Andrés A.I. (2011). Shelf life of Merino lamb meat retail packaged under atmospheres of various compositions. *International Journal of Food Science and Technology* 46: 492-499. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02515.x>
- Hatew B., Stringano E., Mueller-Harvey I., Hendriks W.H., Carbonero C.H., Smith L.M.J., Pellikaan W.F. (2016). Impact of variation in structure of condensed tannins from sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) on *in vitro* ruminal methane production and fermentation characteristics. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 100: 348-360. <https://doi.org/10.1111/jpn.12336>
- Jerónimo E., Alfaia C.M.M., Alves S.P., Dentinho M.T.P., Prates J.A.M., Vasta V., Santos-Silva J., Bessa R.J.B. (2012). Effect of dietary grape seed extract and *Cistus ladanifer* L. in combination with vegetable oil supplementation on lamb meat quality. *Meat Science* 92: 841-847. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.07.011>
- Kobayashi N., Hou F., Tsunekawa A., Yan T., Tegge F., Tassew A., Mekuriaw Y., Mekuriaw S., Hunegnaw B., Mekonnen W., Ichinohe T. (2021). Laser methane detector-based quantification of methane emissions from indoor-fed Fogera dairy cows. *Animal Bioscience* 34: 1415-1424. <https://doi.org/10.5713/ab.20.0739>
- Liu C., Meng Q., Chen Y., Xu M., Shen M., Gao R., Gan S. (2017). Role of age-related shifts in rumen bacteria and methanogens in methane production in cattle. *Frontiers in Microbiology* 8: 1563. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01563>
- MAPA (2023). Raza ovina MERINA. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/zootecnia/razas-ganaderas/razas/catalogo-razas/ovino/merina/datos_productivos.aspx (Consultado 11/10/2023).
- Meinert T.R., Norman H.D. (1998). Merit of outliers for milk yield as indicators of accuracy of genetic evaluations of sires. *Journal of Dairy Science* 81: 2951-2955. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(98\)75857-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(98)75857-6)
- Méndez-Ortiz F.A., Sandoval-Castro C.A., Ventura-Cordero J., Sarmiento-Franco L.A., Torres-Acosta J.F.J. (2018). Condensed tannin intake and sheep performance: A meta-analysis on voluntary intake and live weight change. *Animal Feed Science and Technology* 245: 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.09.001>
- Moate P.J., Williams S.R.O., Torok V.A., Hannah M.C., Ribaux B.E., Tavendale M.H., Eckard R.J., Jacobs J.L., Auldist M.J., Wales W.J. (2014). Grape marc reduces methane emissions when fed to dairy cows. *Journal of Dairy Science* 97: 5073-5087. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7588>
- Morán L., Rodríguez-Calleja J.M., Bodas R., Prieto N., Giráldez F.J., Andrés S. (2012). Carnosic acid dietary supplementation at 0.12% rates slows down meat discoloration in *gluteus medius* of fattening lambs. *Meat Science* 90: 789-795. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.11.016>
- Moumen A., Azizi G., Chekroun K.B., Baghour M. (2016). The effects of livestock methane emission on the global warming. A review. *International Journal of Global Warming* 9: 229-253. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2016.074956>
- Murray R.M., Bryant A.M., Leng R.A. (1976). Rates of production of methane in the rumen and large intestine of sheep. *British Journal of Nutrition* 36: 1-14. <https://doi.org/10.1079/BJN19760053>

- Naumann H.D., Tedeschi L.O., Zeller W.E., Huntley N.F. (2017). The role of condensed tannins in ruminant animal production: Advances, limitations and future directions. *Revista Brasileira de Zootecnia* 46: 929-949. <https://doi.org/10.1590/S1806-92902017001200009>
- Orzuna-Orzuna J.F., Dorantes-Iturbide G., Lara-Bueno A., Mendoza-Martínez G.D., Miranda-Romero L.A., Hernández-García P.A. (2021). Effects of dietary tannins' supplementation on growth performance, rumen fermentation, and enteric methane emissions in beef cattle. A meta-analysis. *Sustainability* 13: 7410. <https://doi.org/10.3390/su13137410>
- Patra A.K., Saxena J. (2010). A new perspective on the use of plant secondary metabolites to inhibit methanogenesis in the rumen. *Phytochemistry* 71: 1198-1222. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2010.05.010>
- Reglamento (CE) n° 152/2009 de la Comisión, de 27 de enero de 2009, por el que se establecen los métodos de muestreo y análisis para el control oficial de los piensos (Texto pertinente a efectos del EEE). *Diario Oficial de la Unión Europea* n° 54, de 26 de febrero de 2009, pp. 1-130.
- Reintke J., Brügemann K., Yin T., Engel P., Wagner H., Wehrend A., König S. (2020). Assessment of methane emission traits in ewes using a laser methane detector: Genetic parameters and impact on lamb weaning performance. *Archives Animal Breeding* 63(1): 113-123. <https://doi.org/10.5194/aab-63-113-2020>
- Ricci P., Chagunda M.G.G., Rooke J., Houdijk J.G.M., Duthie C.A., Hyslop J., Roehe R., Waterhouse A. (2014). Evaluation of the laser methane detector to estimate methane emissions from ewes and steers. *Journal of Animal Science* 92: 5239-5250. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-7676>
- Salami S.A., Valenti B., Bella M., O'Grady M.N., Luciano G., Kerry J.P., Jones E., Priol A., Newbold C.J. (2018). Characterisation of the ruminal fermentation and microbiome in lambs supplemented with hydrolysable and condensed tannins. *FEMS Microbiology Ecology* 94: fiy061. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiy061>
- Samman S., Sandström B., Toft M.B., Bukhave K., Jensen M., Sørensen S.S., Hansen M. (2001). Green tea or rosemary extract added to foods reduces nonheme-iron absorption. *American Journal of Clinical Nutrition* 73: 607-612. <https://doi.org/10.1093/ajcn/73.3.607>
- Sorg D., Difford G.F., Mühlbach S., Kuhla B., Swalve H.H., Lassen J., Strabel T., Pszczola M. (2018). Comparison of a laser methane detector with the GreenFeed and two breath analysers for on-farm measurements of methane emissions from dairy cows. *Computers and Electronics in Agriculture* 153: 285-294. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.024>
- Staerfl S.M., Zeitz J.O., Kreuzer M., Soliva C.R. (2012). Methane conversion rate of bulls fattened on grass or maize silage as compared with the IPCC default values, and the long-term methane mitigation efficiency of adding acacia tannin, garlic, maca and lupine. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 148: 111-120. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.003>
- Tedeschi L.O., Muir J.P., Naumann H.D., Norris A.B., Ramírez-Restrepo C.A., Mertens-Talcott S.U. (2021). Nutritional aspects of ecologically relevant phytochemicals in ruminant production. *Frontiers in Veterinary Science* 8: 628445. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.628445>
- Tedeschi L.O., Abdalla A.L., Álvarez C., Anuga S.W., Arango J., Beauchemin K.A., Becquet P., Berndt A., Burns R., De Camillis C., Chará J., Echazarreta J.M., Hassouna M., Kenny D., Mathot M., Mauricio R.M., McClelland S.C., Niu M., Onyango A.A., Pajuli R., Pereira L.G.R., Del Prado A., Tieri M.P., Uwizye A., Kebreab E. (2022). Quantification of methane emitted by ruminants: a review of methods. *Journal of Animal Science* 100: 1-22. <https://doi.org/10.1093/jas/skac197>
- Tejeda J.F., Peña R.E., Andrés A.I. (2008). Effect of live weight and sex on physico-chemical and sensorial characteristics of Merino lamb meat. *Meat Science* 80: 1061-1067. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.04.026>
- Torres R.N.S., Coelho L.M., Ghedini C.P., Neto O.R.M., Chardulo L.A.L., Torrecilhas J.A., Valença R.L., Baldassini W.A., Almeida M.T.C.

- (2023). Potential of nutritional strategies to reduce enteric methane emission in feedlot sheep: A meta-analysis and multivariate analysis. *Small Ruminant Research* 220: 106919. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2023.106919>.
- Trejo A., Martín M.J., Gómez-Quintana A., Cava R., García-Parra J.J., Ramírez M.R. (2021). Effect of high-pressure treatment and storage temperature on top-quality (Montanera) Iberian dry-cured pork sausages (chorizo). *Journal of Food Science* 86: 1963-1978. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15698>
- Velasco S., Cañeque V., Pérez C., Lauzurica S., Díaz M.T., Huidobro F., Manzanares C., González J. (2001). Fatty acid composition of adipose depots of suckling lambs raised under different production systems. *Meat Science* 59: 325-333. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(01\)00135-8](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(01)00135-8)
- Wischer G., Greiling A.M., Boguhn J., Steingass H., Schollenberger M., Hartung K., Rodehutschord M. (2014). Effects of long-term supplementation of chestnut and valonea extracts on methane release, digestibility and nitrogen excretion in sheep. *Animal* 8(6): 938-948. <https://doi.org/10.1017/S1751731114000639>
- (Aceptado para publicación el 7 de agosto de 2024)

Gestión sostenible de los alimentos. Una aplicación de la Teoría del Comportamiento Planificado en el contexto de un país emergente: Colombia

Julieth Lizcano-Prada¹, Francisco J. Mesías^{2,*}, Olda Lami², Celia Sama-Berrocal² y Marcela Maestre-Matos¹

¹ Facultad de Ciencias Empresariales y Económicas, Universidad del Magdalena, Calle 29H3 n22-02, 470004, Santa Marta, Colombia.

² Departamento de Economía, Universidad de Extremadura, Avda. Adolfo Suárez, s/n, 06007 Badajoz, España.

Resumen

La reducción del desperdicio de alimentos es una preocupación política global urgente. Numerosos estudios respaldan la idea de que los hogares son los principales responsables de los alimentos que se desperdician a lo largo de la cadena de suministro alimentario, con aproximadamente la mitad de los alimentos comestibles que son desechados a nivel global, siendo aún más grave en los países emergentes. En consecuencia, el presente estudio tiene como objetivo examinar el comportamiento de desperdicio de alimentos de los consumidores de un país emergente y comprender cómo perfiles distintos de consumidores y características sociodemográficas influyen en el desperdicio de alimentos. En este contexto, se elaboró un cuestionario y se llevó a cabo una encuesta en Colombia, abarcando una muestra representativa de 720 participantes. Se utilizó el modelado de ecuaciones estructurales (SEM), para analizar el impacto de las actitudes de los consumidores, las normas subjetivas y el control conductual percibido en su intención de reducir el desperdicio de alimentos. Posteriormente, se identificaron los principales impulsores de los comportamientos respecto al desperdicio de alimentos. Los resultados subrayaron que la reducción del desperdicio de alimentos está predominantemente influenciada por el control conductual percibido, seguido de las actitudes, y, finalmente, por las normas subjetivas. Además, factores como la responsabilidad en la compra de alimentos y las actividades culinarias en el hogar, junto con variables sociodemográficas evidenciaron que en gran medida la intención de reducir el desperdicio de alimentos se traduce en resultados conductuales concretos.

Palabras clave: Teoría del Comportamiento Planificado, desperdicio de alimentos, análisis de clúster, sostenibilidad, Colombia.

Sustainable food management: an application of the Theory of Planned Behavior in an emerging country: Colombia

Abstract

The reduction of food waste is an urgent global political concern. Numerous studies support the idea that households are the main contributors to food waste along the food supply chain, with approximately half

* Autor para correspondencia: fjmesias@unex.es

Cita del artículo: Lizcano-Prada J., Mesías F.J., Lami O., Sama-Berrocal C., Maestre-Matos M. (2024). Gestión sostenible de los alimentos. Una aplicación de la Teoría del Comportamiento Planificado en el contexto de un país emergente: Colombia. ITEA-Información Técnica Económica Agraria 120(4): 397-423.
<https://doi.org/10.12706/itea.2024.013>



of the edible food discarded globally. This situation is even more severe in emerging countries. Consequently, the present study aims to examine the food waste behavior of consumers in an emerging country and understand how distinct consumer profiles and sociodemographic characteristics influence food waste. In this context, a questionnaire was developed and a survey was conducted in Colombia, encompassing a representative sample of 720 participants. Structural equation modeling (SEM) was used to analyze the impact of consumers' attitudes, subjective norms, and perceived behavioral control on their intention to reduce food waste. Subsequently, the main drivers of food waste behaviors were identified. The results underscored that the reduction of food waste is predominantly influenced by perceived behavioral control, followed by attitudes, and finally by subjective norms. Additionally, factors such as responsibility for food purchasing and culinary activities at home, along with sociodemographic variables, demonstrated that the intention to reduce food waste largely translates into concrete behavioral outcomes.

Keywords: Theory of Planned Behavior, food waste, cluster analysis, sustainability, Colombia.

Introducción

La gestión sostenible de alimentos se ha convertido en un tema de interés global debido al impacto ambiental del crecimiento poblacional y la necesidad de producir alimentos para más de 8 mil millones de personas en el mundo (AFFAIRS, 2023). Por ello, los consumidores son cada vez más conscientes de los métodos de producción y comercialización de alimentos, demandando que sean sostenibles y de calidad nutricional (Guillen-Royo, 2019; Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO, 2020; Mesías et al., 2023). La producción y comercialización de alimentos contribuyen significativamente al cambio climático, generando alrededor del 30 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (Tubiello et al., 2021). Además, el desperdicio de alimentos es una preocupación central en la agenda global de sostenibilidad dadas sus externalidades negativas en términos económicos, ambientales y sociales (United States Department of Agriculture-USDA, 2019; United Nations Environment Programme-UNEP, 2021; FAO et al., 2022).

El Índice de Desperdicio de Alimentos (UNEP, 2021) estima que el 17 % de los alimentos disponibles para los consumidores se desperdicia y alrededor de dos tercios de este desperdicio ocurre en los hogares. Esta si-

tuación es peor en los países en desarrollo, donde el desperdicio de alimentos supera los 91 kg per cápita anualmente, en comparación con los países desarrollados, con 79 kg per cápita anualmente (Sintov et al., 2019; Septianto et al., 2020). En los países en desarrollo, el desperdicio de alimentos ocurre principalmente en las etapas de postcosecha y procesamiento debido a la falta de instalaciones adecuadas de almacenamiento, transporte y tecnología (Joardder y Masud, 2019). Sin embargo, en Colombia, un país en desarrollo, estudios recientes evidencian que existen prácticas cotidianas que llevan al desperdicio, principalmente asociadas al mal almacenamiento y al inadecuado manejo de comida preparada o sobras en los hogares (WWF y Sancho BBDO, 2022).

El desperdicio de alimentos en Colombia es un hecho que se corresponde con el panorama internacional, puesto que el crecimiento económico del país ha llevado a un aumento en la producción y consumo de alimentos (Martius et al., 2023). Según un estudio del Departamento Nacional de Planeación-DNP (2016), al menos el 30 % de los alimentos producidos en Colombia se pierden o desperdician, lo que representa 9,76 millones de toneladas de alimentos (UNEP, 2021). El desperdicio de alimentos se ha reconocido como un problema significativo con implicaciones

ambientales, sociales, éticas y económicas, por lo que abordarlo requiere un cambio en el comportamiento del consumidor (dos Santos et al., 2022).

En este sentido, la Teoría del Comportamiento Planificado (TCP) (Ajzen, 1991) se ha convertido en un modelo teórico robusto que permite predecir la intención y el comportamiento de las personas (Shen et al., 2022; Rozenkowska, 2023; Viccaro et al., 2023). En el caso de la alimentación, la TCP se ha usado ampliamente para explicar el comportamiento de los consumidores como resultado de las intenciones derivadas de las actitudes, el control percibido del comportamiento y las normas subjetivas (Heidari et al., 2020; Abadi et al., 2021; Shen et al., 2022; Srivastava et al., 2023). En particular, para entender y mitigar el comportamiento relacionado con el desperdicio de alimentos, numerosos estudios han aplicado la TCP. Por ejemplo, Aktas et al. (2018) exploraron el comportamiento del desperdicio de alimentos de los consumidores incorporando factores como actitudes financieras y relaciones sociales. Soorani y Ahmadvand (2019) ampliaron la TCP al incluir la culpa, encontrando que es un predictor significativo de la intención de reducir el desperdicio de alimentos. Blešić et al. (2021) demostraron la aplicación de la TCP en restaurantes, mientras que Coskun y Özbük (2020) validaron aún más la aplicabilidad de la TCP, destacando factores como la conciencia de precios y los hábitos de planificación del hogar.

Sin embargo, existen desafíos significativos en lo que respecta a la Teoría del Comportamiento Planificado del consumidor en países en desarrollo con respecto a sus intenciones de reducir el desperdicio de alimentos (FAO, 2019; WWF y Sancho BBDO 2022) y su impacto en el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados con el consumo y la producción sostenibles (Objetivo 12 de los ODS). En este sentido, la TCP funciona mejor que otras técnicas similares debido a

que se enfoca en el cambio de la conducta de las personas, prestando mayor atención a las actitudes y el comportamiento, las normas subjetivas y el control conductual percibido (Montero Vega et al., 2022).

La reducción de la pérdida y el desperdicio de alimentos pueden generar numerosas ventajas para el sistema alimentario. Esto incluye una disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, la mitigación de la presión sobre los recursos de tierra y agua, y el aumento de la productividad de la tierra. Por lo tanto, estos esfuerzos podrían contribuir a reforzar el crecimiento económico y a establecer una resiliencia a largo plazo en el sector agroalimentario, así como en el conjunto de la sociedad (Kummu et al., 2012; FAO et al., 2022). En el caso de países emergentes, como Colombia, aspectos relacionados con el desperdicio de alimentos son aún más críticos, ya que el 28 % de las familias siguen enfrentando un acceso inadecuado a alimentos esenciales en términos de cantidad y calidad (Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE, 2022).

Es por ello que se hace necesario entender el conocimiento, las actitudes y los comportamientos de los consumidores en relación con el desperdicio de alimentos para reducirlo y mejorar la sostenibilidad de los sistemas alimentarios (Bengtsson et al., 2018). Este aspecto es crucial en el contexto de países emergentes como Colombia donde existe una brecha sustancial debido a la falta de capacidad para recopilar y cuantificar de manera integral los datos relacionados con el consumo (Martius et al., 2023). En consecuencia, la aplicación de la TCP puede contribuir al cierre de esta brecha, mediante el entendimiento del patrón de consumo de alimentos de los consumidores colombianos y generando insumos para las políticas y buenas prácticas que contribuyan a disminuir el desperdicio de alimentos en los hogares (Brancoli et al., 2017; FAO, 2020; Jeswani et al., 2021).

Con base en este contexto, el objetivo principal de este trabajo es identificar los factores que influyen en el comportamiento sostenible del consumo de alimentos entre la población colombiana y con un enfoque específico en el desperdicio de alimentos. Para ello se realiza un análisis usando la TCP en relación con la reducción del desperdicio de alimentos. Además, se profundiza en el análisis estudiando si la responsabilidad de un individuo en la compra y preparación de alimentos influye en sus comportamientos a la hora de desperdiciar alimentos.

Como conclusión del documento se proponen posibles vías para futuras investigaciones e implicaciones prácticas para la reducción del desperdicio de alimentos en los hogares colombianos.

Marco Conceptual

En cuanto a la definición de lo que se entiende por desperdicio de alimentos, esta investigación adopta los conceptos emitidos por la FAO (2014) tratando los términos pérdida de alimentos y desperdicio de alimentos como reducciones en la cantidad o calidad de los alimentos (FAO, 2019), con una distinción en lo que respecta a los actores involucrados.

Por un lado, la pérdida de alimentos está relacionada con la reducción en la cantidad o calidad de los alimentos resultante de decisiones y procedimientos de los proveedores de alimentos en la cadena alimentaria (FAO, 2019). Por otro lado, el desperdicio de alimentos implica una disminución en la cantidad o calidad de los alimentos, donde los minoristas, los consumidores y los servicios de alimentos desempeñan roles fundamentales en la generación de desperdicio (FAO, 2019). Este fenómeno ocurre más adelante en la cadena de suministro, influenciado por el comportamiento de diversos actores (Bajželj et al., 2020), así como por la negligencia del con-

sumidor que lleva al deterioro o vencimiento de los alimentos (FAO, 2014).

El marco teórico empleado en este estudio se basa en la Teoría del Comportamiento Planificado (TCP) (Ajzen, 1991). La TCP intenta predecir el comportamiento de un individuo, el cual está moldeado por su intención de participar en dicho comportamiento (Le y Nguyen, 2022). Además, esta intención está influenciada por tres determinantes principales: actitud, normas subjetivas y control conductual percibido.

La actitud (A) representa las opiniones favorables o desfavorables de un individuo con respecto al comportamiento objetivo (Rozenkowska, 2023). Las normas subjetivas (NS) se definen como la percepción de un individuo sobre la aceptabilidad societal de realizar o abstenerse del comportamiento (Le y Nguyen, 2022). Por último, el control conductual percibido (CCP) se refiere a la facilidad o dificultad que un individuo percibe al realizar el comportamiento (Clough y Casey, 2011). Cuando estos tres determinantes son sólidos, la intención se vuelve firme, llevando al comportamiento deseado (Ajzen, 1991), tal como se ilustra en la Figura 1.

De acuerdo con los postulados de la TCP (Ajzen, 1991), se espera que la actitud, las normas subjetivas y el control conductual percibido expliquen una variación significativa en la intención y, por lo tanto, surjan como predictores positivos de la intención de realizar un determinado comportamiento. En el caso del presente estudio, el comportamiento de reducir el desperdicio de alimentos en los hogares colombianos.

Dado que el desperdicio a nivel del consumidor a menudo se origina por una planificación y compra de comidas inadecuadas, compras excesivas influenciadas por promociones, tamaños de envases demasiado grandes, confusión acerca de etiquetas o a causa de un almacenamiento insuficiente en el hogar (UNEP,

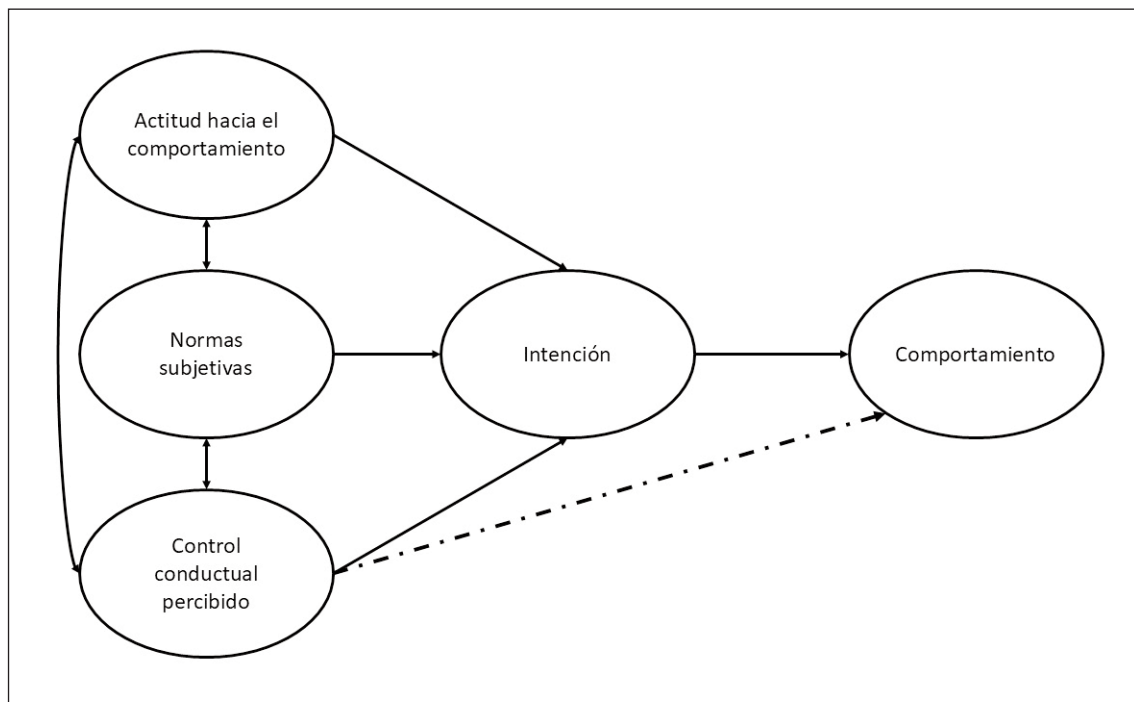


Figura 1. Modelo original de la Teoría del Comportamiento Planificado.
 Figure 1. Theory of Planned Behavior's model.

2021), se utilizaron como variables de segmentación los ítems “¿Eres responsable de las compras de alimentos para el hogar?” y “Frecuencia de cocinar en casa” (Szabó-Bódi et al., 2018; Goossens et al., 2019; Misiak et al., 2020; Kritikou et al., 2021; Nabi et al., 2021; Szakos et al., 2021; WWF y Sancho BBDO, 2022). Por lo tanto, las hipótesis para este estudio son:

- H1: La actitud afecta a la intención de comportamiento para reducir el desperdicio de alimentos.
- H2: Las normas subjetivas afectan a la intención de comportamiento para reducir el desperdicio de alimentos.
- H3: El control conductual percibido afecta a la intención de comportamiento para reducir el desperdicio de alimentos.

- H4: La intención de reducir el desperdicio de alimentos es un predictor del comportamiento final.
- H5: Diferentes perfiles individuales con respecto a la compra y el cocinado de alimentos influyen en cómo la actitud, las normas subjetivas y el control percibido del comportamiento predicen la intención y el comportamiento.

Material y métodos

Recogida de datos

Los datos examinados en este manuscrito se obtuvieron a través de una encuesta que fue difundida en línea en Colombia durante los meses de julio a septiembre de 2023 y que estaba dirigida a consumidores de alimentos

colombianos mayores de 18 años. La encuesta se cargó en un formulario de Microsoft 365 y se compartió a través de distintas listas de distribución colombianas a las que tenían acceso los autores, entre ellas asociaciones profesionales y empresariales, listados de profesores universitarios y estudiantes de posgrado. Se utilizó un muestreo por cuotas en base a aspectos demográficos relacionados con atributos de edad y género que resultasen representativos de la población colombiana (DANE, 2018).

Todos los consumidores que fueron contactados aceptaron participar en el estudio y se les aseguró que sus respuestas se mantenían confidenciales y completamente anónimas. Los encuestados no recibieron ninguna compensación por su participación en el estudio. Antes de enviar el cuestionario, se realizó una prueba piloto con 20 participantes de distintas características sociodemo-

gráficas (mujeres y hombres de diferentes grupos de edad) que permitiese comprobar la idoneidad, claridad y falta de sesgo del cuestionario para mejorar la versión final (Stone, 1993).

Finalmente, el número de cuestionarios válidos fue de 720, después de excluir aquellos de baja calidad, principalmente debido a respuestas incompletas. Esto supone un error de muestreo del 3,7 % para un intervalo de confianza del 95 % ($k = 2$) y proporciones medias, lo que se considera adecuado para este tipo de estudio (Krejcie y Morgan, 1970).

Como se puede observar en la tabla 1, la muestra final estuvo compuesta predominantemente por mujeres (51 %) e individuos con edades comprendidas entre los 35 y 55 años (44 %), con una representación adicional del grupo más joven (<35 años) (38 %) –cifras que son representativas de la población colombiana (DANE, 2018).

Tabla 1. Características de la muestra final y de la población de Colombia (%).
Table 1. Socio-demographic characteristics of the sample and the Colombian population (%).

Característica	Respuesta	Muestra	Colombia
Género (%)	Mujer	51	52
	Hombre	49	48
Edad (%)	18-35 años	38	42
	36-55 años	44	40
	>55 años	18	18
Ingresos (%)	<1000 €/mes	21	44
	1001-2000 €/ mes	32	19
	2001-3000 €/ mes	29	22
	>3000 €/ mes	18	16

El cuestionario utilizado en el estudio

Cada uno de los constructos de esta teoría se evalúa mediante un conjunto de afirmaciones presentadas a los participantes del estudio, a quienes se les instruyó para expresar su acuerdo o desacuerdo utilizando una escala tipo Likert desde 1 (totalmente en desacuerdo) hasta 5 (totalmente de acuerdo). En esta investigación, las afirmaciones que componen cada constructo fueron seleccionadas a partir de revisiones de literatura previas que se detallan en la Tabla 2.

Análisis estadístico

Para examinar las hipótesis, los datos se analizaron utilizando el modelado de ecuaciones estructurales de mínimos cuadrados parciales (PLS-SEM) mediante el software SMART PLS. El modelado de ecuaciones estructurales (SEM) es una técnica analítica común en ciencias sociales y del comportamiento, utilizada para representar, estimar y evaluar redes teóricas de relaciones lineales entre variables, ya sean observables o no observables (Hair et al., 2006; Maestre-Matos et al., 2023). SEM incluye dos métodos principales: el basado en covarianza (CB-SEM) y el basado en varianza (PLS-SEM), siendo este último adecuado tanto para predicción como para explicación, mientras que el primero se orienta principalmente a la explicación (Hair et al., 2017; Dash y Paul, 2021). PLS-SEM también ofrece mayor flexibilidad para explorar diversas configuraciones (Dash y Paul, 2021), por lo que se eligió como el enfoque analítico para esta investigación.

La metodología empleada para realizar el análisis de los datos en la presente investigación comprende tres pasos clave, tal como se explica en la figura 2:

Según lo indicado por Chin (1998) y Hair et al. (2014), los coeficientes utilizados en este estudio para medir el modelo general son i) carga factorial estandarizada, utilizada para

probar la confiabilidad de los elementos y verificar el cumplimiento de las suposiciones del modelo lineal general; ii) alfa de Cronbach, utilizado para probar la confiabilidad de los constructos con respecto a sus elementos (consistencia interna); iii) la confiabilidad compuesta de los constructos mediante ρ_a y ρ_c ; iv) Varianza Media Extraída (AVE) para probar la validez de los constructos; v) Coeficientes de ruta, utilizados para evaluar los efectos entre constructos; vi) Valores p, utilizados para probar la significación de las relaciones entre constructos.

Posteriormente al análisis con ecuaciones estructurales, se empleó el análisis de clústeres para facilitar un examen más completo, identificando subgrupos homogéneos de consumidores que podrían mostrar comportamientos diversos con respecto al desperdicio de alimentos. Los cálculos se llevaron a cabo utilizando el módulo de clúster del paquete estadístico IBM SPSS v.21, utilizando un procedimiento de dos pasos. A pesar del uso común del clúster jerárquico en la investigación (Menegassi et al., 2019; Bernal-Gil et al., 2020), se eligió una combinación de clustering jerárquico y no jerárquico (k-means), según lo recomendado por varios autores que permitiese aprovechar las fortalezas de ambos métodos (Hair et al., 2014; Malhotra et al., 2017).

Inicialmente, se realizó un clúster jerárquico utilizando el Método de Ward con las variables de entrada mencionadas anteriormente así como las características sociodemográficas. La determinación del número final de clústeres se basó en el coeficiente de aglomeración proporcionado por SPSS (Hair et al., 2014), lo que proporcionó dos soluciones con 3 y 4 grupos de consumidores. Posteriormente, se llevaron a cabo análisis de clústeres k-means, utilizando los centroides de clúster del análisis jerárquico como semillas iniciales para el procedimiento no jerárquico. Los criterios para la selección de la solución final, según lo recomendado por Hair et al. (2014) incluyeron el tamaño de los clústeres, dife-

Tabla 2. Descripción de constructos e ítems de la encuesta.

Table 2. Constructs and items of the survey.

Constructos	Indicadores
Actitud (Soorani y Ahmadvand, 2019; van der Werf et al., 2020).	
AT1	Me molesta que los alimentos que no se utilizan acaben en la basura.
AT2	Creo que conocer las diferencias entre las “fecha de vencimiento” y “consumir preferiblemente antes de” es muy importante para reducir el desperdicio de alimentos.
AT3	Es inmoral que se desperdicien alimentos mientras otras personas pasan hambre.
AT4	Creo que malgastar comida es malgastar dinero.
AT5	A veces pienso en reducir mi desperdicio de alimentos.
AT6	Evitar el desperdicio de alimentos es responsabilidad de todos.
AT7	Pienso siempre en el medio ambiente cuando desperdicio comida.
Normas Subjetivas (Oehman et al., 2022).	
SN1	La mayoría de mis familiares y amigos están sensibilizados con el desperdicio de alimentos y siempre tratan de evitarlo.
SN2	Intento proporcionar la cantidad adecuada de alimentos necesarios cuando tengo invitados para evitar sobras.
SN3	A mi familia/amigos no les parece bien que yo desperdicie alimentos.
SN4	En mi entorno, la presión social me hace sentir culpable cuando tiro comida.
SN5	Reducir el desperdicio de alimentos en los hogares beneficiará a las generaciones futuras.
SN6	Reducir los residuos domésticos de alimentos es el deber de un ciudadano responsable.
Control Conductual Percibido (van der Werf et al., 2020).	
PBC1	Encuentro fácil preparar una nueva comida a partir de los sobrantes de otras comidas.
PBC2	Encuentro fácil planear mi compra de tal forma que toda la comida que se compra sea consumida.
PBC3	Antes de preparar la comida, siempre tengo en cuenta la cantidad exacta que necesito y lo que haré con las sobras.
PBC4	En mi casa siempre planifico las comidas con antelación y me ajusto a ese plan.
PBC5	No pienso que comer sobras de comidas perjudique a mi salud.
Intención (Bretter et al., 2022; van der Werf et al., 2020).	
IN1	Tengo la intención de reutilizar todas las sobras de comida que se generen en mi hogar.
IN2	Tengo la intención de comprobar regularmente las fechas de consumo preferente de los alimentos que tengo en casa para evitar que se estropeen.
IN3	Tengo la intención de reducir la cantidad de comida que se desperdicia en mi hogar prestando más atención a mis compras.
IN4	Tengo la intención de reducir la cantidad de comida que se desperdicia en mi hogar prestando más atención al tamaño de las porciones.
Comportamiento (Bretter et al., 2022; Soorani yAhmadvand, 2019;).	
B1	Antes de hacer la compra de alimentos, verifico lo que tengo en casa.
B2	Hago una lista de la compra antes de ir a comprar alimentos y me ajusto a la misma.
B3	Compro la cantidad necesaria de alimentos incluso cuando hay promociones.
B4	Para minimizar las sobras de alimentos, intento comprar cantidades más pequeñas.
B5	En mi familia, las sobras de alimentos se comen tal cual o se reutilizan en otras comidas.
B6	Ajusto mi plan de comidas en casa para aprovechar las sobras de alimentos.

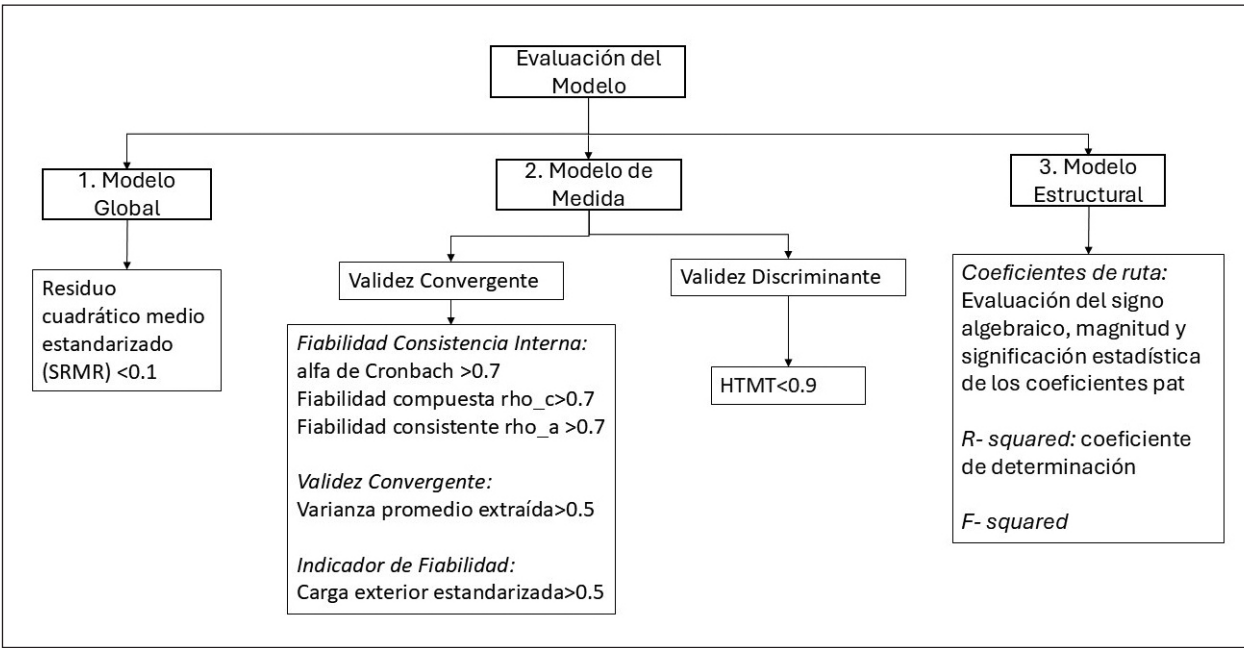


Figura 2. Evaluación del modelo PLS-SEM.
Figure 2. PLS-SEM model evaluation.

rencias significativas entre los clústeres en las variables de agrupamiento y validación externa mediante la interpretación de los clústeres. Considerando estos factores, se eligió finalmente una solución de 3 segmentos. Por último, el análisis de la varianza demostró diferencias significativas ($p < 0,001$) entre todos los segmentos con respecto a las variables incluidas en el análisis, confirmando la validez de todos los resultados.

Resultados

Subgrupos de los encuestados basados en el análisis de clúster

Inicialmente en esta investigación se segmentó la muestra en tres grupos teniendo en cuenta características sociodemográficas específicas, así como la frecuencia de compra y

de cocinado de alimentos de los individuos encuestados, como se muestra a continuación en la Tabla 3.

Tal y como muestra la tabla anterior, el Clúster 1 está compuesto principalmente por mujeres activamente involucradas en la compra y en el cocinado de alimentos, de mediana edad, y niveles de ingresos altos. La denominación de este grupo de consumidores en el resto del trabajo será “Mujeres comprometidas en la compra y cocinado de alimentos”.

El Clúster 2 está compuesto principalmente por hombres, con edades jóvenes y medianas e ingresos medio-altos, involucrados en la compra de alimentos, pero menos en el cocinado. De este modo, este grupo se denomina “Hombres jóvenes y de mediana edad involucrados en la compra de alimentos, pero no en la cocina”.

Tabla 3. Características de cada grupo.

Table 3. Cluster's characteristics.

Característica	Respuesta	Clúster 1 (50,4 %)	Clúster 2 (28,3 %)	Clúster 3 (21,3 %)	Total muestra
Encargado de las compras de alimentos para el hogar*** (%)	Siempre	100	19,6		56,9
	Algunas veces		36,3	52,9	21,5
	Raramente		44,1	47,1	22,5
Frecuencia de cocina en casa*** (%)	Diario	85,4		87,6	61,7
	Algunas veces	14,6	14,2	12,4	14,0
	Raramente		85,8		24,3
Género* (%)	Mujer	58,7	38,7	49,0	51,0
	Hombre	41,3	61,3	51,0	49,0
Edad** (%)	18-35 años	30,6	44,1	49,7	38,0
	36-55 años	49,6	39,2	36,6	44,0
	>55 años	19,8	16,7	13,7	18,0
Ingresos** (%)	<1000 €/mes	12,9	16,2	22,9	21,0
	1001-2000 €/ mes	21,8	21,6	21,6	32,0
	2001-3000 €/ mes	19,0	16,7	20,9	29,0
	>3000 €/ mes	46,3	45,6	34,6	18,0

Significación: * $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,001$. Clúster 1: Mujeres comprometidas en la compra y coccinado de alimentos. Clúster 2: Hombres jóvenes y de mediana edad involucrados en la compra de alimentos, pero no en la cocina. Clúster 3: Hombres y mujeres jóvenes aficionados a la cocina.

Finalmente, el Clúster 3 está compuesto tanto por hombres como por mujeres jóvenes con ingresos medio-altos que se encargan de cocinar a diario y que están menos involucrados en la compra. Este grupo de consumidores pasará a denominarse "Hombres y mujeres jóvenes aficionados a la cocina".

Análisis SEM

Aplicando el modelo teórico (Figura 1) y las perspectivas de la literatura de la TCP, se desarrolló un modelo de medición compuesto reflexivo general, en el cual cada variable latente es medida por indicadores definidos en la sección de metodología. El modelo SEM

fue aplicado a la muestra completa y posteriormente replicado en cada clúster siguiendo el procedimiento de evaluación del modelo de medición. La fiabilidad de los elementos se evaluó considerando que las cargas (λ) o las correlaciones simples de los indicadores superaran el valor de $\lambda \geq 0,4$, según lo indicado por Hair et al. (2011) (Figura 2).

Análisis del modelo global

Resultados del modelo de medición

Se utilizó el indicador de error estándar de la raíz media estandarizada (SRMR, por sus siglas en inglés) (Hu y Bentler, 1998), recomendado por Henseler (2017), con un valor de

0,10 (Hair et al., 2011) para un buen ajuste de los estudios. En esta investigación, el valor de SRMR es 0,071; cumpliendo con el estándar establecido.

La evaluación del modelo de medición comprende tres componentes (Figura 2) para probar la validez convergente: la confiabilidad de la consistencia interna, la validez convergente y el indicador de fiabilidad. La Tabla 3 muestra que los coeficientes alfa de Cronbach (Kline, 1999), la Fiabilidad Compuesta (ρ_a) (Werts et al., 1974) y ρ_c (Dijkstra y Henseler, 2015) superan el valor de 0,7; indicando la fiabilidad de los modelos de medición.

La validez convergente, medida a través del promedio de la varianza extraída (AVE), representa la capacidad explicativa integral de los indicadores para sus variables latentes. El valor mínimo de AVE debe ser 0,5 (Fornell y Larcker, 1981; Afthanorhan, 2013). Los valores de AVE de este estudio cumplen con este criterio (Tabla 4).

La fiabilidad se evalúa a través de las cargas externas estandarizadas, también llamadas cargas factoriales (λ), que representan el coeficiente de correlación entre la variable latente y sus indicadores. Según Afthanorhan (2013), el valor mínimo de carga debe ser 0,5. En este estudio, el valor más bajo es 0,510 (correspondiente al indicador SN3), y el más alto es 0,942 (correspondiente a IN3) (Tabla 3). Según la evaluación de la validez convergente, como se explica anteriormente y se resume en la Tabla 3, el modelo global cumple con todos los requisitos de validez del modelo de medición.

En esta investigación, se empleó el método Heterotrait-Monotrait (HTMT) para probar la validez discriminante, con un valor por debajo de 0,9 (Henseler et al., 2016) (Tabla 5); por lo tanto, se determina que el modelo exhibe validez discriminante.

Resultados del modelo estructural

Para la evaluación del modelo estructural se aplicó bootstrapping con un intervalo de confianza del 90 % y con 5000 muestras, para determinar la correlación estadística entre las variables latentes. La Tabla 5 resume los resultados del modelo estructural.

Estos resultados sugieren que todos los factores de la TCP contribuyen significativamente a la reducción del comportamiento de desperdicio de alimentos. En la evaluación del modelo estructural, los coeficientes oscilan entre +1 y -1 (Tabla 5: Coeficientes de ruta). También se puede observar en la Tabla 6 que todas las hipótesis generan el mismo signo algebraico que se estableció en el modelo teórico con un nivel de significación de $p < 0,01$. Por lo tanto, todas las hipótesis son aprobadas.

Este estudio confirma que "actitud", "CCP" y "NS" afectan a la "intención". En particular, se encontró que "CCP" tiene el valor de coeficiente de ruta más alto, lo que implica que los individuos perciben facilidad para reducir el desperdicio de alimentos. "NS" ocupó el segundo lugar con el segundo valor de coeficiente de ruta más alto. Por su parte el constructo "actitud" tiene el coeficiente de ruta más débil. Además, se encontró que la "intención" de reducir el desperdicio de alimentos es un fuerte predictor del "comportamiento" final. Por otro lado, el coeficiente de determinación (R^2) sigue los valores de criterios de (Falk y Miller, 1992), en un rango de 0 a 1. Los valores de R^2 deben ser lo suficientemente altos para lograr un nivel mínimo de poder explicativo de este modelo, por lo que esta cifra debe cumplir con un mínimo de $R^2 \geq 0,10$; siendo para este caso R^2 Comportamiento = 0,58 y R^2 Intención = 0,509; el cual según la escala para evaluar R^2 según Chin (1998) es moderado¹.

¹ $R^2 > 0,67$ es sustancial; R^2 entre 0,19 y 0,67 es moderado y $R^2 < 0,19$ es débil (Chin, 1998).

Tabla 4. Evaluación del modelo de medición para el modelo global.
Table 4. Evaluation of overall model measurement.

Constructo	Indicador	Cargas Factoriales (λ)	Alfa de Cronbach	Fiabilidad Consistente (ρ_a)	Fiabilidad Compuesta (ρ_c)	Varianza Promedio Extraída (AVE)
Actitud	AT1	0,651	0,880	0,893	0,910	0,630
	AT2	0,739				
	AT3	0,793				
	AT4	0,887				
	AT5	0,789				
	AT6	0,879				
Normas Subjetivas	SN3	0,510	0,722	0,835	0,847	0,662
	SN5	0,924				
	SN6	0,933				
Control Conductual	PBC3	0,913	0,775	0,780	0,899	0,816
Percibido	PBC4	0,894				
Intención	IN2	0,835	0,886	0,897	0,930	0,815
	IN3	0,942				
	IN4	0,929				
	B1	0,822				
Comportamiento	B2	0,783	0,756	0,795	0,831	0,501
	B4	0,661				
	B5	0,568				
	B6	0,673				

Tabla 5. Resultados de la validez discriminante - Criterio de Fornell Larcker.
Table 5. Discriminant validity results - Fornell-Larcker criterion.

Constructo	Actitud	Comportamiento	Intención	CCP	NS
Actitud					
Comportamiento	0,686				
Intención	0,677	0,830			
CCP	0,524	0,782	0,660		
NS	0,757	0,777	0,744	0,564	

CCP: control conductual percibido; NS: normas subjetivas.

Tabla 6. Evaluación de hipótesis del modelo global.
Table 6. Overall model-evaluation of hypothesis.

Variables/Relación evaluada	Coefficientes de ruta	Desviación estándar	Estadísticos-T	Valores-P
H1: Actitud→Intención	0,256	0,050	5,111	0,000***
H2: NS→Intención	0,296	0,056	5,329	0,000***
H3: CCP→Intención	0,315	0,037	8,473	0,000***
H4: Intención→Comportamiento	0,720	0,025	28,825	0,000***

Nota: * Indica el nivel de significación del valor-P * $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; y *** $p < 0,01$. NS: normas subjetivas. CCP: control conductual percibido,

Análisis de clúster

Para la evaluación del modelo global en cada uno de los clústeres definidos en la clasificación de los encuestados en la subsección “Resultados del modelo de medición”, se utilizaron los criterios de evaluación del modelo definidos en la sección “Análisis del modelo global”. A continuación, en la tabla 7 se describen los resultados encontrados.

El valor de SRMR para todos los clústeres cumple con los criterios de Ringle et al. (2009), es decir que el límite de SRMR es de 0,10. En cuanto a la evaluación del modelo de medi-

ción, la tabla 6 muestra que los coeficientes alfa de Cronbach, la fiabilidad compuesta (rho_a) y rho_c superan el valor de 0,7; lo que indica la fiabilidad de los modelos de medición. Además, el indicador de fiabilidad (λ) supera el valor de 0,5. Finalmente, los valores AVE representan al menos el 50 % de todos los constructos.

Para la validez discriminante de los clústeres, se utilizó el método HTMT que asigna un valor por debajo de 0,9. Por lo tanto, la evaluación del modelo de medición es favorable, considerando que todos los clústeres cumplen con todos los criterios de evaluación.

Tabla 7. Evaluación del modelo de medición global para los clústeres.
Table 7. Evaluation of clusters model measurement.

Construtto	Indicador	Cargas Factoriales (λ)	Alfa de Cronbach	Fiabilidad Consistente (rho_a)	Fiabilidad Compuesta (rho_c)	Varianza Promedio Extraída (AVE)
Mujeres comprometidas en la compra y cocinado de alimentos						
Actitud	AT1	0,579	0,869	0,887	0,902	0,611
	AT2	0,744				
	AT3	0,798				
	AT4	0,900				
	AT5	0,766				
	AT6	0,861				
NS	SN3	0,490	0,721	0,858	0,845	0,661
	SN5	0,926				
	SN6	0,941				
CCP	PBC3	0,894	0,742	0,742	0,886	0,795
	PBC4	0,889				
Intención	IN2	0,791	0,863	0,883	0,917	0,787
	IN3	0,938				
	IN4	0,925				
Comportamiento	B1	0,824	0,755	0,800	0,829	0,501
	B2	0,767				
	B4	0,639				
	B5	0,597				
	B6	0,670				
Hombres jóvenes y de mediana edad involucrados en la compra de alimentos, pero no en la cocina						
Actitud	AT1	0,743	0,899	0,904	0,923	0,668
	AT2	0,754				
	AT3	0,793				
	AT4	0,874				
	AT5	0,826				
	AT6	0,904				

NS: normas subjetivas. CCP: control conductual percibido.

Tabla 7. Evaluación del modelo de medición global para los clústeres (continuación).
Table 7. Evaluation of clusters model measurement (continuation).

Construtto	Indicador	Cargas Factoriales (λ)	Alfa de Cronbach	Fiabilidad Consistente (rho_a)	Fiabilidad Compuesta (rho_c)	Varianza Promedio Extraída (AVE)
NS	SN3	0,603	0,770	0,842	0,870	0,698
	SN5	0,923				
	SN6	0,936				
CCP	PBC3	0,935	0,815	0,840	0,914	0,842
	PBC4	0,900				
Intención	IN2	0,899	0,919	0,924	0,948	0,860
	IN3	0,946				
	IN4	0,936				
Comportamiento	B1	0,822	0,766	0,803	0,838	0,513
	B2	0,808				
	B4	0,675				
	B5	0,569				
	B6	0,675				
Hombres y mujeres jóvenes aficionados a la cocina						
Actitud	AT1	0,651	0,880	0,893	0,910	0,630
	AT2	0,739				
	AT3	0,793				
	AT4	0,887				
	AT5	0,789				
	AT6	0,879				

NS: normas subjetivas. CCP: control conductual percibido.

Tabla 7. Evaluación del modelo de medición global para los clústeres (continuación).
Table 7. Evaluation of clusters model measurement (continuation).

Construtto	Indicador	Cargas Factoriales (λ)	Alfa de Cronbach	Fiabilidad Consistente (ρ_a)	Fiabilidad Compuesta (ρ_c)	Varianza Promedio Extraída (AVE)
NS	SN3	0,510	0,722	0,835	0,847	0,662
	SN5	0,924				
	SN6	0,933				
CCP	PBC3	0,913	0,775	0,780	0,899	0,816
	PBC4	0,894				
Intención	IN2	0,835	0,886	0,897	0,930	0,815
	IN3	0,942				
	IN4	0,929				
Comportamiento	B1	0,822	0,756	0,795	0,831	0,500
	B2	0,783				
	B4	0,661				
	B5	0,568				
	B6	0,673				

NS: normas subjetivas. CCP: control conductual percibido.

Para evaluar el modelo estructural, se revisaron los coeficientes de ruta y su nivel de significación. En consecuencia, a un nivel de significación del 1 %, se encontró que todas las hipótesis eran significativas, excepto la hipótesis 2 para el clúster “Hombres jóvenes y de mediana edad involucrados en la compra de alimentos, pero no en la cocina” (Tabla 8). Similar al modelo global, se encontró que el constructo “CCP” tenía el valor más alto de coeficiente de ruta, excepto para el clúster de “Mujeres comprometidas en la compra y cocinado de alimentos”. Por otro lado, el constructo “actitud” obtuvo el coeficiente de ruta más débil, en este mismo clúster. Asimismo, para este clúster se encontró que el constructo “NS” tenía el coeficiente de ruta más alto.

Sin embargo, esta correlación no fue significativa en los otros dos clústeres. También, se encontró una alta correlación entre “intención” y “comportamiento” en todos los clústeres, similar al modelo global. Dadas estas diferencias encontradas entre los clústeres, se puede concluir que diferentes perfiles individuales influyen en cómo se predice la “intención” sobre el “comportamiento”. Por lo tanto, la hipótesis 5 fue aprobada.

Finalmente, se determinó el efecto (f^2) de las relaciones entre los constructos (Tabla 9). También se determinaron los coeficientes R^2 . En este estudio, se concluyó que los efectos entre los constructos en todos los clústeres están asociados con el modelo global. El efecto

Tabla 8. Evaluación de hipótesis para los clústeres.
Table 8. *Clusters model-evaluation of hypothesis.*

Variables/Relación evaluada	Coeficientes de ruta	Desviación estándar	Estadísticos-T	Valores-P
Mujeres comprometidas en la compra y cocinado de alimentos				
Actitud→Intención	0,166	0,069	2,411	0,016**
NS→Intención	0,455	0,079	5,795	0,000***
CCP→Intención	0,236	0,048	4,965	0,000***
Intención→Comportamiento	0,699	0,039	17,995	0,000***
Hombres jóvenes y de mediana edad involucrados en la compra de alimentos, pero no en la cocina				
Actitud→Intención	0,347	0,073	4,722	0,000***
NS→Intención	0,100	0,070	1,427	0,154
CCP→Intención	0,465	0,065	7,205	0,000***
Intención→Comportamiento	0,735	0,040	18,246	0,000***
Hombres y mujeres jóvenes aficionados a la cocina				
Actitud→Intención	0,256	0,050	5,111	0,000***
NS→Intención	0,296	0,056	5,329	0,000***
CCP→Intención	0,315	0,037	8,473	0,000***
Intención→Comportamiento	0,720	0,025	28,825	0,000***

Nota: * Indica el nivel de significación del valor-P * $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; y *** $p < 0,01$. NS: normas subjetivas. CCP control conductual percibido.

entre Actitud e Intención es pequeño, excepto para el clúster “Hombres jóvenes y de mediana edad involucrados en la compra de alimentos, pero no en la cocina”. Además, el efecto NS→Intención es pequeño, excepto para el clúster “Mujeres comprometidas en la compra y cocinado de alimentos. Por otra parte, se observó un efecto medio en los constructos CCP→Intención. Finalmente, el efecto más significativo ocurre entre Intención→Comportamiento.

Discusión

Modelo Global

Los hallazgos en este estudio muestran que el “CCP” es el constructo más importante y estadísticamente más significativo con la “intención” de reducir el desperdicio de los alimentos, lo cual está en línea con estudios anteriores, tales como Amato et al. (2021), Lin y Guan (2021), y Schrank et al. (2023). La se-

Tabla 9. Evaluación de efectos para los clústeres.
Table 9. Evaluation of effects for clusters.

	Clúster 1	Clúster 2	Clúster 3
Coeficientes R ^{2a}			
R ² _Comportamiento	0,489	0,540	0,518
R ² _Intención	0,528	0,584	0,509
F-Square (f ^{2b})			
Actitud→Intención	0,028	0,131	0,062
NS→Intención	0,209	0,012	0,085
CCP→Intención	0,091	0,399	0,159
Intención→Comportamiento	0,958	1,173	1,075

^a Categorización del R² de acuerdo con Chin (1998): R² < 0,19: débil; 0,19 ≤ R² ≤ 0,67: moderado; R² > 0,67 sustancial. ^b Efectos: Reglas heurísticas (Cohen, 1988): 0,02 ≤ f² < 0,15: Efecto pequeño; 0,15 ≤ f² < 0,35: Efecto Moderado; f² ≥ 0,35: Efecto Grande. NS: normas subjetivas. CCP control conductual percibido. Clúster 1: Mujeres comprometidas en la compra y cocinado de alimentos. Clúster 2: Hombres jóvenes y de mediana edad involucrados en la compra de alimentos, pero no en la cocina. Clúster 3: Hombres y mujeres jóvenes aficionados a la cocina.

gunda correlación más importante y positiva con la “intención” fueron las “NS”, lo que implica que los individuos que percibían prevenir el desperdicio de alimentos como una actividad aceptada positivamente por su entorno, al mismo tiempo eran más propensos a tener una mayor “intención” de mi-

nimizar el desperdicio de alimentos. Este hallazgo contrasta con las conclusiones de otros estudios que sitúan el “CCP” como el predictor más influyente de la “intención” de no desperdiciar alimentos (Soorani y Ahmadvand, 2019; Chun T’ing et al., 2021; Bhatti et al., 2023).

A pesar de que algunos estudios anteriores destacan la “actitud” como un predictor clave de la “intención” de reducir el desperdicio de alimentos (Dalila et al., 2020; Heidari et al., 2020; Srivastava et al., 2023), los hallazgos de la presente investigación revelan que su impacto es menor, especialmente en personas responsables de la compra y cocinado de alimentos, quienes podrían estar adoptando prácticas de gestión subóptimas de los alimentos (Aloysius et al., 2023; Deliberador et al., 2023). En el contexto colombiano, un estudio de WWF y Sancho BBDO (2022) demostró que hay prácticas cotidianas que llevan al desperdicio, principalmente asociadas al mal almacenamiento y al inadecuado manejo de comida preparada o sobras.

Los consumidores de alimentos generalmente tienen una actitud negativa hacia el desperdicio de alimentos. Sin embargo, frente a objetivos en conflicto como reducir posibles riesgos para la salud o la proveeduría adecuada de alimentos para el hogar, pueden inhibir su intención de reducir el desperdicio de alimentos. Esto demuestra que la “actitud” por sí sola puede no ser un predictor fuerte si existen otros objetivos (Barone et al., 2019).

Comparaciones entre los clústeres

En cuanto al SEM a nivel de clúster, todos los clústeres se alinean con el modelo general, excepto el grupo de “Mujeres comprometidas en la compra y cocinado de alimentos”, donde el “CCP” fue el predictor más débil sobre la “intención” de reducir el desperdicio de alimentos. Este grupo se conformó con la mayoría de la población joven y mujeres, en donde las “NS” explicaron mejor la “intención” de reducir el desperdicio de alimentos. Este hallazgo está en línea con el de Schrank et al. (2023) quienes encontraron que las mujeres perciben un mayor grado de responsabilidad en la reducción del desperdicio de alimentos y también son más propensas a

dejarse influir por las opiniones y expectativas de los demás (NS) en relación con la reducción del desperdicio de alimentos. Asimismo, Bhatti et al. (2023) encontraron que las “NS” tenían una relación positivamente significativa con la intención de reducir el desperdicio de alimentos entre mujeres jóvenes, contrastando los resultados de Tahir (2023), quien observó que el efecto de las “NS” sobre la “intención” de reducir el desperdicio de alimentos, era más fuerte para los hombres que para las mujeres.

En el caso de los “Hombres y mujeres jóvenes aficionados a la cocina”, las “NS” tuvieron un efecto significativo en la “intención” de reducir el desperdicio de alimentos. Este hallazgo coincide con Nikolaus et al. (2018) quienes han encontrado que los adultos jóvenes reducen el desperdicio de alimentos, principalmente, porque este comportamiento está implantado en sus normas sociales, lo que implica que pueden estar influenciados por su deseo de mantener una imagen positiva entre sus amigos y, por tanto, evitan desperdiciar los alimentos. En cuanto los “Hombres jóvenes y de mediana edad involucrados en la compra de alimentos, pero no en la cocina”, las “NS” fueron el predictor más débil sobre la “intención” de reducir el desperdicio de alimentos. Estos resultados difieren de los hallazgos de Xu et al. (2017), quienes notaron que el grupo de mediana edad fue el único que mostró una relación significativa entre las “NS” y la “intención” de reducir el desperdicio de alimentos. En el contexto colombiano, e incluso latinoamericano, ocurre lo mismo que en otros países desarrollados, los consumidores pueden presentar una disonancia frente al desperdicio: manifiestan que no lo hacen por vergüenza o por considerarlo éticamente incorrecto, pero se hace en la práctica (Ayala Enríquez et al., 2024).

Por otra parte, en la relación entre “actitud”, “CCP” e “intención” se evidenció que hay un mayor efecto entre los grupos de “Hombres

jóvenes y de mediana edad involucrados en la compra de alimentos, pero no en la cocina" y "Hombres y mujeres jóvenes aficionados a la cocina", que en las "Mujeres comprometidas en la compra y cocina". Estos resultados coinciden con los de Heidari et al. (2020), Xu et al. (2017) y Viccaro et al. (2023) quienes encontraron que el "CCP" y la "actitud" tienen un efecto más fuerte sobre la "intención" de reducir el desperdicio de los alimentos entre la población de mediana edad que entre los jóvenes. Para la Generación Z, la "actitud" está fuertemente ligada a la "intención" de reducir el desperdicio de alimentos, mientras que la relación entre el "CCP" y la "intención" de reducir el desperdicio de alimentos es mínima. En contraste, en la Generación Y, la influencia del "CCP" en la "intención" de reducir el desperdicio de alimentos es significativamente mayor. Por ende, entre más joven sea la población, su intención de evitar el desperdicio de alimentos se ve mayormente influenciada por la percepción de que el desperdicio es negativo ("NS"); mientras que, para los adultos jóvenes, el factor más relevante en la intención es su percepción de controlar el desperdicio de alimentos ("CCP"). Estos resultados están alineados con los estudios de Tsai et al. (2020) y Lu et al. (2022), donde se evidenció que los grupos demográficos de edades medias muestran más autocontrol para reducir el comportamiento de desperdicio y un mayor dominio de las habilidades relacionadas con la alimentación en el hogar, lo cual expresa una mayor sensación de control sobre las actividades relacionadas con la alimentación, incluida la utilización de las sobras de comida.

En contraste, en el grupo "Mujeres comprometidas en la compra y cocinado de alimentos" la "actitud" y el "CCP" son los predictores menos significativos sobre la "intención" de reducir el desperdicio de alimentos. Este hecho se puede atribuir a que las mujeres demuestran una mayor disposición para adquirir pro-

ductos en grandes cantidades y aprovechar los descuentos en alimentos en supermercados, los cuales suelen resultar en un desperdicio posterior en los hogares (Jungowska et al., 2021). La conducta exhibida por las mujeres se caracteriza por ser la de un "buen proveedor", enfocándose en el cuidado de los miembros de su familia y asegurando un suministro de alimentos saludables y frescos que puede exceder a las necesidades básicas (Kritikou et al., 2021). Este comportamiento puede llevar a que el ahorro inicial generado por las compras a precios reducidos se traduzca en niveles más altos de desperdicio alimentario en las etapas de cocina y almacenamiento (Barone et al., 2019).

Al revisar la "intención" de reducir el desperdicio de alimentos en los grupos de altos ingresos ("Mujeres comprometidas en la compra y cocinado de alimentos" y "Hombres jóvenes y de mediana edad involucrados en la compra de alimentos, pero no en la cocina"), se evidenció una fuerte influencia en el "comportamiento" de reducir el desperdicio de alimentos y en menor proporción en las personas de ingresos bajos y medios altos (Hombres y mujeres jóvenes aficionados a la cocina). Este hallazgo difiere de investigaciones previas, como las llevadas a cabo por Czajkowski et al. (2017), que indicaron que las personas con bajos ingresos tienden a adoptar prácticas generales de reducción de desperdicios, incluido el desperdicio de alimentos, con el propósito de economizar recursos financieros. Asimismo, se ha probado que las personas con ingresos más altos poseen una mayor disposición para gastar dinero. Esta libertad financiera les permite adquirir alimentos innecesarios, los cuales, en última instancia, son desechados (Czajkowski et al., 2017). En consecuencia, nuestros resultados se alinean con los de otras investigaciones, encontrando que las limitaciones económicas pueden predisponer a las personas de bajos ingresos a la sobrecompra de alimentos en oferta y de ca-

lidad inferior, los cuales posteriormente son desperdiciados (Barone et al., 2019; Dhakal y Khadka, 2021).

Aunque los resultados de este estudio han confirmado que todos los predictores establecidos en la TCP ("actitud", "CCP" e "intención") influyen en el "comportamiento" a la hora de reducir el desperdicio de alimentos, se observó también que el factor diferencial entre la "intención" de reducir el desperdicio de los alimentos y el "comportamiento" efectivo de hacerlo, radica en los ingresos de los hogares colombianos. Este hecho está de acuerdo con los resultados de Mejía Tejada et al. (2022). De esta forma, se confirma que los grupos de mayor ingreso exhiben una mayor intención para reducir el desperdicio de alimentos.

Los hallazgos de los clústeres muestran el mismo patrón del modelo general: las personas con mayores responsabilidades en la compra y preparación de alimentos muestran un menor impacto de la "intención" sobre el "comportamiento" de reducir el desperdicio de alimentos. Esto se evidencia en mayor medida en el grupo "Mujeres comprometidas en la compra y cocinado de alimentos", en contraste, con los grupos de "Hombres jóvenes y de mediana edad involucrados en la compra de alimentos, pero no en la cocina" y "Hombres y mujeres jóvenes aficionados a la cocina". En el caso colombiano, las sobras de comida son los alimentos más desperdiciados, con un 65,2 % de los hogares colombianos desechándolos. Entretanto, el 33,5 % de los hogares colombianos desperdicia comida por el vencimiento de los productos (WWF y Sancho BBDO, 2022). Asimismo, se ha observado en las mujeres, quienes comúnmente desempeñan en Colombia el papel de "cocineras del hogar", que la conexión con la compra y preparación de alimentos está arraigada en la tradición. Los hábitos de consumo de los colombianos están definidos tanto por la salud o el bienestar como por la tradición familiar, lo que significa que la

forma en que cocinan los alimentos está vinculada a una transferencia de conocimiento y que sus hábitos alimenticios están condicionados por la manera en que fueron educados (Idárraga-Tunjo et al., 2020). Esta tradición está acompañada por la herencia campesina; es parte de la conexión que las personas establecen con la naturaleza y la producción de alimentos, lo cual dificulta en cierta medida la adopción de hábitos orientados hacia una gestión sostenible de alimentos.

Conclusiones

Este trabajo analizó el desperdicio de alimentos en Colombia utilizando la Teoría del Comportamiento Planificado (TCP), confirmando que los predictores actitud, control conductual percibido y normas subjetivas son factores que afectan y explican la intención y comportamiento respecto al desperdicio de alimentos de los consumidores. En particular, aspectos relacionados con la responsabilidad de la compra y la preparación de alimentos permitieron la diferenciación en tres grupos de consumidores que posteriormente fueron explicados según características sociodemográficas como género, edad e ingresos. El análisis indicó diferencias significativas en los resultados del modelo TCP entre estos grupos, siendo el control conductual percibido el factor más influyente sobre la intención de reducir el desperdicio de alimentos.

Aunque la intención, en términos generales, influyó positivamente sobre el comportamiento de reducción del desperdicio de alimentos en todos los individuos, su impacto fue más débil entre aquellos a cargo de la compra y preparación de alimentos. Por tanto, se destaca la necesidad de desarrollar estrategias dirigidas a reducir el desperdicio de alimentos en los hogares colombianos que con-

sideren los diferentes niveles de ingresos y gastos en alimentos existentes.

Esta investigación contribuye no solo a enriquecer la literatura sobre la TCP y el desperdicio de alimentos desde la perspectiva de un país en desarrollo como Colombia, sino también empíricamente, ya que los resultados pueden respaldar el desarrollo de políticas y campañas para abordar el desperdicio de alimentos. Por ejemplo, el desarrollo de campañas pedagógicas para fomentar la compra responsable de alimentos, el uso de porciones más pequeñas en los platos y la compra de frutas y verduras de proximidad en el país.

Como limitaciones se tiene que una muestra más grande y representativa en términos de características sociodemográficas habría sido preferible para este estudio; sin embargo, esto fue difícil de lograr debido a los recursos asignados a la investigación. Por lo tanto, se recomiendan estudios más profundos con respecto a los hallazgos del bajo impacto de los predictores de la TCP sobre la intención de reducir el desperdicio de alimentos. No obstante, los resultados obtenidos pueden extrapolarse a otros países en desarrollo con características similares a las analizadas en este documento, con el fin de desarrollar investigaciones futuras y planificar acciones de marketing de consumo y gestión sostenible de alimentos.

Los hallazgos de este estudio pueden ayudar a reducir la brecha entre los agricultores, las empresas alimentarias y los consumidores en términos consumo de alimentos sostenibles, mediante el rediseño de las preferencias individuales hacia la valoración de la conservación de alimentos, mediante la comunicación asertiva de la importancia de la reducción del desperdicio de alimentos a través de diversos medios, redes sociales, escuelas y supermercados. Se recomiendan estrategias personalizadas, como recetarios con base en las sobras de comida, especialmente, para las personas a cargo de la compra y preparación de alimentos.

Referencias bibliográficas

- Abadi B., Mahdavian S., Fattahi F. (2021). The waste management of fruit and vegetable in wholesale markets: Intention and behavior analysis using path analysis. *Journal of Cleaner Production* 279: 123802. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123802>.
- AFFAIRS. (2023). World population prospects 2022: Summary of results. UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3. Department of Economic and Social Affairs, United Nations. New York, USA. 37 pp.
- Afthanorhan W. (2013). A comparison of partial least square structural equation modeling (PLS-SEM) and covariance based structural equation modeling (CB-SEM) for confirmatory factor analysis. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology* 2(5): 198-205.
- Ajzen I. (1991). The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 50(2): 179-211. [https://doi.org/10.1016/0749-5978\(91\)90020-T](https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T).
- Aktas E., Sahin H., Topaloglu Z., Oledinma A., Huda A.K.S., Irani Z., Sharif A.M., Wout T., Kamrava M. (2018). A consumer behavioural approach to food waste. *Journal of Enterprise Information Management* 31: 658-673. <https://doi.org/10.1108/JEIM-03-2018-0051>.
- Aloysius N., Ananda J., Mitsi A., Pearson D. (2023). Why people are bad at leftover food management? A systematic literature review and a framework to analyze household leftover food waste generation behavior. *Appetite* 186: 106577. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2023.106577>.
- Amato M., Verneau F., Coppola A., La Barbera F. (2021). Domestic food waste and Covid-19 concern: An application of the theory of planned behaviour. *Sustainability* 13(15): 8366. <https://doi.org/10.3390/su13158366>.
- Ayala Enríquez P., Berrún Castañón L.N., Vázquez Parra J.C. (2024). Hambre Cero. Narraciones y esfuerzos institucionales. Editorial Digital del Tecnológico de Monterrey. Monterrey, Nuevo León, México. 311 pp.
- Bajželj B., Quested T.E., Rös E., Swannell R.P.J. (2020). The role of reducing food waste for re-

- silient food systems. *Ecosystem Services* 45: 101140. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101140>.
- Barone A.M., Grappi S., Romani S. (2019). "The road to food waste is paved with good intentions": When consumers' goals inhibit the minimization of household food waste. *Resources, Conservation and Recycling* 149: 97-105. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.037>.
- Bengtsson M., Alfredsson E., Cohen M., Lorek S., Schroeder, P. (2018). Transforming systems of consumption and production for achieving the sustainable development goals: moving beyond efficiency. *Sustainability Science* 13: 1533-1547. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0582-1>
- Bernal-Gil N.Y., Favila-Cisneros H.J., Zaragoza-Alonso J., Cuffia F., Rojas-Rivas E. (2020). Using projective techniques and Food Neophobia Scale to explore the perception of traditional ethnic foods in Central Mexico: A preliminary study on the beverage Sende. *Journal of Sensory Studies* 35(6): e12606. <https://doi.org/10.1111/joss.12606>.
- Bhatti S.H., Saleem F., Zakariya R., Ahmad A. (2023). The determinants of food waste behavior in young consumers in a developing country. *British Food Journal* 125(6): 1953-1967. <https://doi.org/10.1108/BFJ-06-2019-0450>.
- Blešić I., Petrović M.D., Gajić T., Tretiakova T.N., Syromiatnikova J.A., Radovanović M., Popov-Raljić J., Yakovenko N.V. (2021). How the extended theory of planned behavior can be applied in the research of the influencing factors of food waste in restaurants: learning from Serbian urban centers. *Sustainability* 13(16): 9236. <https://doi.org/10.3390/su13169236>
- Brancoli P., Roustas K., Bolton K. (2017). Life cycle assessment of supermarket food waste. *Resources, Conservation and Recycling* 118: 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.11.024>
- Bretter, C., Unsworth, K. L., Russell, S. V., Quested, T. E., Doriza, A., & Kaptan, G. (2022). Don't put all your eggs in one basket: Testing an integrative model of household food waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 185, 106442.
- Chin W.W. (1998). The partial least squares approach to structural equation modeling. En: *Modern Methods for Business Research* (Ed. Marcoulides) pp. 295-336. Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Chun T'ing L., Moorthy K., Gunasaygaran N., Sek Li C., Omapathi D., Jia Yi H., Anandan K., Sivakumar K. (2021). Intention to reduce food waste: A study among Malaysians. *Journal of the Air & Waste Management Association* 71(7): 890-905. <https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1900001>.
- Clough B.A., Casey L.M. (2011). Technological adjuncts to increase adherence to therapy: a review. *Clinical Psychology Review* 31(5): 697-710. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2011.03.006>.
- Coskun A., Özbük R.M.Y. (2020). What influences consumer food waste behavior in restaurants? An application of the extended theory of planned behavior. *Waste management* 117: 170-178. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.011>.
- Czajkowski M., Hanley N., Nyborg K. (2017). Social norms, morals and self-interest as determinants of pro-environment behaviours: the case of household recycling. *Environmental and Resource Economics* 66: 647-670. <https://doi.org/10.1007/s10640-015-9964-3>.
- Dalila N., Latif H., Jaafar N., Aziz I., Afthanorhan A. (2020). The mediating effect of personal values on the relationships between attitudes, subjective norms, perceived behavioral control and intention to use. *Management Science Letters* 10(1): 153-162. <https://doi.org/10.5267/j.msl.2019.8.007>
- Dash G., Paul J. (2021). CB-SEM vs PLS-SEM methods for research in social sciences and technology forecasting. *Technological Forecasting and Social Change* 173: 121092. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121092>.
- Deliberador L.R., Batalha M.O., da Silva César A., Azeem M.M., Lane J.L., Carrijo P.R.S. (2023). Why do we waste so much food? Understanding household food waste through a theoretical framework. *Journal of Cleaner Production* 419: 137974. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137974>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE. (2018). Censo Nacional de Población y vivienda. Boletín Técnico. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/esta->

- disticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018 (consultado: 03/07/2023)
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE. (2022). Escala de experiencia de inseguridad alimentaria (FIES) – Boletín Técnico. Bogotá, Colombia. 23 pp.
- Departamento Nacional de Planeación-DNP. (2016). Pérdida y desperdicio de alimentos en Colombia. Bogotá, D.C, Colombia. Recuperado de: https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Sinergia/Documentos/Estudio_Perdidas_desperdicios_alimentos_Ficha.pdf (consultado: 03/07/2023)
- Dhakal C.K., Khadka S. (2021). Heterogeneities in consumer diet quality and health outcomes of consumers by store choice and income. *Nutrients* 13(4): 1046. <https://doi.org/10.3390/nu13041046>.
- Dijkstra T.K., Henseler J. (2015). Consistent and asymptotically normal PLS estimators for linear structural equations. *Computational Statistics & Data Analysis* 81: 10-23. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2014.07.008>.
- dos Santos J.I.A.S., da Silveira D.S., da Costa M.F., Duarte R.B. (2022). Consumer behaviour in relation to food waste: A systematic literature review. *British Food Journal* 124(12): 4420-4439. <https://doi.org/10.1108/BFJ-09-2021-1075>.
- Falk R.F., Miller N.B. (1992). A primer for soft modeling. University of Akron Press. Akron, Ohio, Usa. 102 pp.
- FAO. (2014). Definitional Framework of Food Loss. Global Initiative on Food Loss and Waste Reduction. Working paper. FAO, Roma, Italia. 18 pp.
- FAO. (2019). The State of Food and Agriculture. Rome.
- FAO. (2020). Perspectivas para la producción y el comercio mundial de bananos y frutas tropicales 2019-2028. FAO, Roma, Italia, 14 pp.
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO (2022). The State of Food Security and Nutrition in the World 2022. Repurposing food and agricultural policies to make healthy diets more affordable. FAO, Roma Italia. 260 pp. <https://doi.org/10.4060/cc0639en>
- Fornell C., Larcker D.F. (1981). Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error. *Journal of Marketing Research* 18(1): 39-50. <https://doi.org/10.1177/002224378101800104>
- Goossens Y., Wegner A., Schmidt T. (2019). Sustainability assessment of food waste prevention measures: review of existing evaluation practices. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 3: 476725. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00090>.
- Guillen-Royo M. (2019). Sustainable consumption and wellbeing: Does on-line shopping matter? *Journal of Cleaner Production* 229: 1112-1124. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.061>.
- Hair J.F., Black W.C., Babin B.J., Anderson R.E., Tatham R.L. (2006). Multivariate data analysis 6th Edition. Pearson Prentice Hall. New Jersey. 928 pp.
- Hair J.F. (2009). Multivariate Data Analysis. Faculty and Research Publications. <https://digitalcommons.kennesaw.edu/facpubs/2925>
- Hair J.F., Ringle C.M., Sarstedt M. (2011). PLS-SEM: Indeed a silver bullet. *Journal of Marketing Theory and Practice* 19(2): 139-152. <https://doi.org/10.2753/MTP1069-6679190202>.
- Hair J.F., Black W.C., Babin B.J., Anderson R.E. (2014). Multivariate data analysis 7th edition. Pearson New International Edition. Harlow, Essex, UK. 734 pp.
- Hair J., Hollingsworth C.L., Randolph A.B., Chong A.Y.L. (2017). An updated and expanded assessment of PLS-SEM in information systems research. *Industrial Management & Data Systems* 117(3): 442-458. <https://doi.org/10.1108/IMDS-04-2016-0130>.
- Heidari A., Mirzaii F., Rahnama M., Alidoost F. (2020). A theoretical framework for explaining the determinants of food waste reduction in residential households: a case study of Mashhad, Iran. *Environmental Science and Pollution Research* 27: 6774-6784. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06518-8>.
- Henseler J., Hubona G., Ray P.A. (2016). Using PLS path modeling in new technology research: updated guidelines. *Industrial Management & Data Systems* 116(1): 2-20. <https://doi.org/10.1108/IMDS-09-2015-0382>.

- Henseler J. (2017). Bridging design and behavioral research with variance-based structural equation modeling. *Journal of Advertising* 46(1): 178-192. <https://doi.org/10.1080/00913367.2017.1281780>.
- Hu L.T., Bentler P.M. (1998). Fit indices in covariance structure modeling: Sensitivity to underparameterized model misspecification. *Psychological Methods* 3(4): 424.
- Idárraga Tunjo D. (2020). La alimentación sostenible en consumidores habituales del modelo alternativo de distribución de alimentos en Colombia. Estudio comparativo de cinco ciudades: Armenia, Bogotá, Medellín, Manizales y Pereira. Tesis de Maestría. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.
- Jeswani H.K., Figueroa-Torres G., Azapagic A. (2021). The extent of food waste generation in the UK and its environmental impacts. *Sustainable Production and Consumption* 26: 532-547. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.12.021>.
- Joardder M.U., Masud M.H. (2019). Food preservation in developing countries: challenges and solutions. Springer Cham. 245 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-11530-2>.
- Jungowska J., Kulczy ski B., Sidor A., Gramza-Michałowska A. (2021). Assessment of factors affecting the amount of food waste in households run by polish women aware of well-being. *Sustainability* 13(2): 976. <https://doi.org/10.3390/su13020976>.
- Kline R.B. (1999). Book Review: Psychometric Theory (3rd Ed.), *Journal of Psychoeducational assessment*. 17(3): 275-280. <https://doi.org/10.1177/073428299901700307>.
- Krejcie R.V., Morgan D.W. (1970). Determining sample size for research activities. *Educational and psychological measurement* 30(3): 607-610. <https://doi.org/10.1177/001316447003000308>.
- Kritikou T., Panagiotakos D., Abeliotis K., Lasaridi K. (2021). Investigating the determinants of Greek households food waste prevention behaviour. *Sustainability* 13(20): 11451. <https://doi.org/10.3390/su132011451>.
- Kummu, M., De Moel H., Porkka M., Siebert S., Varis O., Ward P.J. (2012). Lost food, wasted resources: Global food supply chain losses and their impacts on freshwater, cropland, and fertiliser use. *Science of the Total Environment* 438: 477-489. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.092>.
- Le M.H., Nguyen P.M. (2022). Integrating the theory of planned behavior and the norm activation model to investigate organic food purchase intention: evidence from Vietnam. *Sustainability* 14(2): 816. <https://doi.org/10.3390/su14020816>.
- Lin B., Guan C. (2021). Determinants of household food waste reduction intention in China: The role of perceived government control. *Journal of Environmental Management* 299: 113577. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113577>.
- Lu J., Zhang W., Xiao Y., Yiridoe E.K. (2022). A Behavioural Model of Urban Household Food Waste Reduction: An Empirical Study in Beijing, China. En *Environmental Sustainability in Emerging Markets: Consumer, Organisation and Policy Perspectives* (ed. Nguyen, N., Nguyen, H.V., D'Souza, C., Strong, C.), pp. 47-68. Springer. Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2408-8_3
- Maestre-Matos M., Lombana-Coy J., Mesias F.J. (2023). Creation of shared value in cooperatives: informal institutions' perspective of small-sized banana growers from Colombia. *Journal of Economics, Finance and Administrative Science* 28(55): 134-159. <https://doi.org/10.1108/JEFAS-09-2021-0186>
- Malhotra N.K., Nunan D., Birks D.F. (2017). *Marketing research: An applied approach* 5th edition. Pearson. Harlow, UK. 976 pp.
- Martius C., Wassmann R., Mwambo F., Pingault N., Guérin L. (2023). Food system emissions in Colombia and their reduction potential. A country profile. Occasional Paper 4. Bogor, Indonesia: CIFOR (Center for International Forestry Research); and Nairobi, Kenya: World Agroforestry (ICRAF).
- Mejía Tejada D., Díaz M.F., Charry A., Enciso K., Burkart S. (2022). COVID-19 and household food waste in Colombia: The effects of the strict lockdown in 2020. Poster prepared for Tropentag 2022 – Can Agroecological Farming Feed the World? Farmers' and Academia's Views. 14-16 Septiembre 2022. Praga, Chequia.

- Menegassi B., de Morais Sato P., Scagliusi F.B., Moubarac J.C. (2019). Comparing the ways a sample of Brazilian adults classify food with the NOVA food classification: An exploratory insight. *Appetite* 137: 226-235. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2019.03.010>.
- Mesías F.J., Fernández J.A., Hornillo A., Escribano A.J (2023). An approach to the perceptions of Spanish consumers on food sustainability through the use of projective techniques. *New Medit: Mediterranean Journal of Economics, Agriculture and Environment* 22(1): 35-52. <https://doi.org/10.30682/nm2301c>.
- Misiak M., Kruger D., Kruger J.S., Sorokowski P. (2020). Moral judgments of food wasting predict food wasting behavior. *British Food Journal* 122(11): 3547-3565. <https://doi.org/10.1108/BFJ-07-2019-0576>.
- Montero Vega M., García Barquero M., Sánchez Gómez I. (2022). Conductas de pérdidas y desperdicios de alimentos de tres sectores en Costa Rica. *RIVAR* 9(26): 229-248. <https://doi.org/10.35588/rivar.v9i26.5589>.
- Nabi N., Karunasena G.G., Pearson D. (2021). Food waste in Australian households: Role of shopping habits and personal motivations. *Journal of Consumer Behaviour* 20(6): 1523-1533. <https://doi.org/10.1002/cb.1963>.
- Nikolaus C.J., Nickols-Richardson S.M., Ellison B. (2018). Wasted food: a qualitative study of US young adults' perceptions, beliefs and behaviors. *Appetite* 130: 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2018.07.026>.
- Oehman J.M., Babbitt C.W., Flynn, C. (2022). What predicts and prevents source separation of household food waste? An application of the theory of planned behavior. *Resources, Conservation and Recycling* 186: 106492. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106492>
- Ringle C.M., Götz O., Wetzels M., Wilson B. (2009). On the use of formative measurement specifications in structural equation modeling: A Monte Carlo simulation study to compare covariance-based and partial least squares model estimation methodologies. *METEOR Research Memoranda (RM/09/014)*. Faculty of Economics and Business Administration. Maastricht, The Netherlands. 41 pp.
- Rozenkowska K. (2023). Theory of planned behavior in consumer behavior research: A systematic literature review. *International Journal of Consumer Studies* 47(6): 2670-2700. <https://doi.org/10.1111/ijcs.12970>.
- Schrank J., Hanchai A., Thongsalab S., Sawaddee N., Chanrattanaorn K., Ketkaew C. (2023). Factors of food waste reduction underlying the extended theory of planned behavior: A study of consumer behavior towards the intention to reduce food waste. *Resources* 12(8): 93. <https://doi.org/10.3390/resources12080093>
- Septianto F., Kemper J.A., Northey G. (2020). Thanks, but no thanks: The influence of gratitude on consumer awareness of food waste. *Journal of Cleaner Production* 258: 120591. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120591>.
- Shen X., Xu Q., Liu Q. (2022). Predicting sustainable food consumption across borders based on the theory of planned behavior: A meta-analytic structural equation model. *PloS One* 17(11): e0275312. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275312>.
- Sintov N., Geislar S., White L.V. (2019). Cognitive accessibility as a new factor in proenvironmental spillover: Results from a field study of household food waste management. *Environment and Behavior* 51(1): 50-80. <https://doi.org/10.1177/0013916517735638>.
- Soorani F., Ahmadvand M. (2019). Determinants of consumers' food management behavior: Applying and extending the theory of planned behavior. *Waste Management* 98: 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.08.025>.
- Srivastava S.K., Mishra A., Singh S., Jaiswal D. (2023). Household food waste and theory of planned behavior: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Science and Pollution Research* 30(43): 97645-97659. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29141-0>
- Stone D.H. (1993). Design a questionnaire. *BMJ: British Medical Journal* 307: 1264-1266. <https://doi.org/10.1136/bmj.307.6914.1264>
- Szabó-Bódi B., Kasza G., Szakos D. (2018). Assessment of household food waste in Hungary. *British Food Journal* 120(3): 625-638. <https://doi.org/10.1108/BFJ-04-2017-0255>.

- Szakos D., Szabó-Bódi B., Kasza G. (2021). Consumer awareness campaign to reduce household food waste based on structural equation behavior modeling in Hungary. *Environmental Science and Pollution Research* 28: 24580-24589. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09047-x>
- Tahir M.M. (2023). Determinants of food waste: TPB and moderating impact of demographics & guilt. *Journal of Global Hospitality and Tourism* 2(2): 157-182.
- Tsai W.C., Chen X., Yang C. (2020). Consumer food waste behavior among emerging adults: Evidence from China. *Foods* 9(7): 961. <https://doi.org/10.3390/foods9070961>.
- Tubiello F.N., Rosenzweig C., Conchedda G., Karl K., Gütschow J., Xueyao P., Obli-Laryea G., Wanner N., Qiu S.Y., De Barros J. (2021). Greenhouse gas emissions from food systems: building the evidence base. *Environmental Research Letters* 16(6): 065007. <https://www.doi.org/10.1088/1748-9326/ac018e>
- United Nations Environment Programme-UNEP. (2021). Food waste index report 2021. UNEP Nairobi, Kenya. 100 pp.
- United States Department of Agriculture W.-USDA. (2019). Join Statement of Western Hemisphere Agriculture Leaders.
- van der Werf P., Seabrook J.A., Gilliland J.A. (2020). Food for thought: Comparing self-reported versus curbside measurements of household food wasting behavior and the predictive capacity of behavioral determinants. *Waste Management* 101: 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.032>
- Viccaro M., Coppola A., D'Angelo M.C., Genovese F., Romano S., Cozzi M. (2023). Young People Are Not All the Same! The Theory of Planned Behaviour Applied to Food Waste Behaviour across Young Italian Generations. *Sustainability* 15(20): 14741. <https://doi.org/10.3390/su152014741>
- Werts C.E., Linn R.L., Jöreskog K.G. (1974). Intra-class reliability estimates: Testing structural assumptions. *Educational and Psychological Measurement* 34(1): 25-33. <https://doi.org/10.1177/001316447403400104>.
- WWF, Sancho BBDO. (2022). El verdadero valor de los alimentos: Imaginarios comportamientos y realidades de la relación alimentación-naturaleza en Colombia. Departamento de Inteligencia y Consumidor. Sancho BBDO. 278 pp.
- Xu L., Ling M., Lu Y., Shen M. (2017). Understanding household waste separation behaviour: Testing the roles of moral, past experience, and perceived policy effectiveness within the theory of planned behaviour. *Sustainability* 9(4) 625: <https://doi.org/10.3390/su9040625>

(Aceptado para publicación el 27 de agosto de 2024)

PREMIOS DE PRENSA AGRARIA 2024 DE LA ASOCIACIÓN INTERPROFESIONAL PARA EL DESARROLLO AGRARIO

La Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario (AIDA) otorga un premio anual de Prensa Agraria para destacar aquel artículo de los publicados en ITEA en el año 2024 que reúna las mejores características técnicas, científicas y de valor divulgativo y de transferencia al sector, así como un impacto relevante de sus resultados. El artículo deberá reflejar el espíritu fundacional de AIDA de hacer de transmisor de conocimientos hacia el profesional, técnico o empresario agrario. Se concederá un premio, pudiendo quedar desierto.

Los premios se regirán de acuerdo a las siguientes

BASES

1. Podrán concursar todos los artículos que versen sobre cualquier tema técnico-económico-agrario.
2. Los artículos que podrán acceder al premio serán todos aquellos que se publiquen en ITEA en el año 2024. Consecuentemente, los originales deberán ser enviados de acuerdo con las normas de ITEA y aprobados por su Comité de Redacción.
3. El jurado estará constituido por las siguientes personas:
 - a) Presidencia de AIDA, que presidirá el jurado.
 - b) Dirección de la revista ITEA, que actuará de Secretario.
 - c) Dirección del CITA (Gobierno de Aragón).
 - d) Dirección del Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza.
 - e) Dirección de la Estación Experimental de Aula Dei.
 - f) Dirección del Instituto Pirenaico de Ecología.
4. El premio será anual y tendrá una dotación económica.
5. Las deliberaciones del jurado serán secretas, y su fallo inapelable.
6. El fallo del jurado se dará a conocer en la revista ITEA, y la entrega del premio se realizará con motivo de la celebración de las Jornadas de Estudio de AIDA.

Si desea Vd. pertenecer a la Asociación debe rellenar esta ficha de inscripción y la siguiente hoja sobre Protección de datos.

INSCRIPCIÓN EN AIDA

Si desea Vd. pertenecer a la Asociación rellene la ficha de inscripción y envíela a la siguiente dirección:

Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario (AIDA). Avenida Montañana, 930, 50059 Zaragoza.

Si elige como forma de pago la domiciliación bancaria adjunte a esta hoja de inscripción el impreso de domiciliación sellado por su banco.

También puede hacer una transferencia a la cuenta de AIDA (Caixabank, Ag. Zuera (Zaragoza), España, nº ES70 2100 8687 2702 0001 2107) por el importe de la cuota anual. En ese caso, adjunte un comprobante de la transferencia.

Apellidos:		Nombre:	
NIF:			
Dirección Postal:			
Teléfono:		Fax:	e-mail:
Empresa:			
Área en que desarrolla su actividad profesional:			
		En _____, a ____ de _____ de 20__	
		Firma:	

FORMA DE PAGO (COUTA ANUAL: 50 EUROS)

☐	Cargo a cuenta corriente (rellenar la domiciliación bancaria)
☐	Transferencia a la cuenta de AIDA ES70 2100 8687 2702 0001 2107 (adjuntar comprobante)

DOMICILIACION BANCARIA

Sr. Director del Banco/Caja			
Muy Sr. mío,			
Ruego a Vd. se sirva adeudar en la siguiente cuenta corriente (IBAN: 24 caracteres)			
que mantengo en esa oficina, el recibo anual que será presentado por la Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario (AIDA) .			
Atentamente,			
En _____, a ____ de _____ de 20__		Sello de la Entidad:	
Firmado:			

PROTECCIÓN DE DATOS

ASOCIACIÓN INTERPROFESIONAL PARA EL DESARROLLO AGRARIO, de ahora en adelante AIDA, le informa de que los datos facilitados durante su relación con la Asociación serán tratados para gestionar el alta de socio, así como para las gestiones administrativas de la Asociación. La base legal para el tratamiento de sus datos es la relación contractual y su consentimiento. Sus datos podrán ser cedidos a las entidades que sea necesarias para el cumplimiento de nuestras obligaciones legales, y si así lo autoriza, a las empresas colaboradoras de la Asociación. Tiene derecho a acceder, rectificar, suprimir, oponerse al tratamiento de sus datos, así como retirar el consentimiento prestado y pedir su portabilidad.

AUTORIZACIONES

- ☐ * – Autoriza a que AIDA le envíe información a través de medios postales y/o electrónicos (correo electrónico, SMS, etc.) sobre noticias de la asociación, así como información de servicios de sus patrocinadores y/o colaboradores.
- Autoriza a que AIDA pueda facilitar sus datos de contacto a las empresas patrocinadoras o colaboradoras con fines comerciales. ☐ Sí ☐ No *

* Debe responder a estas cuestiones obligatoriamente.

Por último, en aras a dar cumplimiento al Reglamento (UE) 2016/679 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de abril de 2016, relativo a la protección de las personas físicas en lo que respecta al tratamiento de datos personales y a la libre circulación de estos datos, y siguiendo las Recomendaciones e Instrucciones emitidas por la Agencia Española de Protección de Datos (A.E.P.D.),

SE INFORMA

- Los datos de carácter personal solicitados y facilitados por usted, son incorporados a un fichero de titularidad privada cuyo responsable y único destinatario es AIDA, con domicilio en Avenida Montañana, no 930, 50059 - Zaragoza.
- Solo serán solicitados aquellos datos estrictamente necesarios para prestar adecuadamente los servicios solicitados, pudiendo ser necesario recoger datos de contacto de terceros, tales como representantes legales, tutores, o personas a cargo designadas por los mismos.
- Todos los datos recogidos cuentan con el compromiso de confidencialidad, con las medidas de seguridad establecidas legalmente, y bajo ningún concepto son cedidos o tratados por terceras personas, físicas o jurídicas, sin el previo consentimiento del socio, tutor o representante legal, salvo en aquellos casos en los que fuere imprescindible para la correcta prestación del servicio.
- Una vez finalizada la relación entre la Asociación y el socio, los datos seguirán archivados y conservados mientras sean necesarios para dar cumplimiento a las obligaciones legales o, en su defecto, serán devueltos íntegramente al socio (o autorizado legal) o suprimidos si así se solicita por su parte.
- Los datos que facilite serán incluidos en el Tratamiento denominado Socios de AIDA, con la finalidad de gestión del alta de socio, la gestión del servicio contratado, pago de cuotas, contacto, etc., y todas las gestiones relacionadas con los socios y manifiesto mi consentimiento.
- Tiene derecho a acceder a sus datos personales, a solicitar su rectificación, cancelación y oposición, indicándolo por escrito a AIDA con domicilio en Avenida Montañana, no 930, 50059 – Zaragoza, o al correo electrónico de la Asociación: administracion@aidaitea.org.
- Los datos personales serán cedidos por AIDA a las entidades que prestan servicios a la misma siempre que sea estrictamente necesario para llevar a cabo los servicios ofrecidos por la Asociación. Igualmente, sus datos serán cedidos si existe una obligación legal.

Nombre y apellidos del Socio:

DNI:

Representante legal (si lo hubiere):

DNI:

En _____, a ____ de _____ de 20 ____

FIRMA DEL SOCIO:

NORMAS PARA LOS AUTORES

Puede encontrar toda la información sobre como hacer los envíos,
las directrices de como hacer los manuscritos y las licencias
bajo las que se publican los artículos en nuestra web, en la URL
<https://www.aida-itea.org/index.php/revista-itea/envio-de-articulos>

Volumen 120

Número 4

Diciembre 2024

itea

información técnica económica agraria
www.aida-itea.org

REVISTA DE LA ASOCIACIÓN INTERPROFESIONAL PARA EL DESARROLLO AGRARIO

