

INFLUENCIA DE LA RADIACIÓN SOLAR EN LA ACUMULACIÓN DE MATERIA SECA DEL LLANTÉN FORRAJERO (*PLANTAGO LANCEOLATA* L.)

INFLUENCE OF SOLAR RADIATION ON DRY MATTER ACCUMULATION OF FODDER PLANTAIN (*PLANTAGO LANCEOLATA* L.)

Recibido: 07/04/2025 - **Aceptado:** 05/06/2025

Yosselyn Mabel Ortiz Pantoja

Investigadora Independiente
Ecuador

Ingeniera Zootecnista
Pontificia Universidad Católica del Ecuador - Sede Ibarra

ymortiz@pucesi.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0000-4807-2415>

Maritza de los Ángeles Mier Quiroz

Docente de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Ibarra
Ibarra - Ecuador

Magíster en Zootecnia y Gestión Sostenible Ganadería Ecológica Integrada
Universidad de Córdoba

mdmier@pucesi.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-3016-3842>

Cómo citar este artículo:

Ortiz, Y., & Mier, M. (Julio – diciembre 2025). Influencia de la radiación solar en la acumulación de materia seca del llantén forrajero (*Plantago lanceolata* L.). *Sathiri*, 20 (2), 199 – 219. <https://doi.org/10.32645/13906925.1402>

Resumen

La radiación solar influye directamente en la acumulación de materia seca, pero también es crucial determinar el momento óptimo para aprovechar el contenido nutricional de las pasturas. En el caso del llantén forrajero (*Plantago lanceolata* L.), se recomienda su aprovechamiento cuando alcanza entre 6 a 7 hojas verdaderas, estableciéndose entre los 7 a 10 días, a diferencia del trébol blanco, que lo hace en 10 a 12 días. Es importante considerar que las plantas maduras tienden a acumular compuestos antinutricionales, como taninos, que reducen su palatabilidad y digestibilidad, además de contribuir a las emisiones de gases de efecto invernadero. El cambio climático también reduce los periodos de crecimiento, afectando la calidad de las pasturas. Esta investigación tiene como objetivo evaluar, mediante un análisis documental, la acumulación de materia seca, proteína y energía en el llantén forrajero, considerando variables climáticas como la radiación solar, la humedad relativa y la precipitación. Se utilizó una metodología basada en revisión bibliográfica de artículos científicos publicados entre 2015 y 2025, provenientes de bases de datos como Scopus, ScienceDirect y Web of Science, enfocando la búsqueda en países productores. Los resultados mostraron que Colombia presentó los datos más equilibrados (3750 kg/ha MS, 153,62 kWh/m² de radiación, 77 % de humedad relativa y 3240 mm de precipitación), concluyéndose que el llantén forrajero es una especie resiliente y eficiente en diversas condiciones climáticas, con un mayor potencial productivo en zonas con radiación de 150-200 kWh/m² y precipitaciones entre 1000 y 3000 mm, condiciones similares a las del Ecuador.

Palabras clave: cambio climático, sostenibilidad, producción forrajera, biomasa.

Abstract

Solar radiation directly influences the accumulation of dry matter, but it is also crucial to determine the optimum moment to take advantage of the nutritional content of pastures. In the case of fodder plantain (*Plantago lanceolata* L.), it is recommended to use it when it reaches 6 to 7 true leaves, establishing between 7 to 10 days, as opposed to white clover, which does so in 10 to 12 days. It is important to consider that mature plants tend to accumulate anti-nutritional compounds, such as tannins, which reduce their palatability and digestibility, in addition to contributing to greenhouse gas emissions. Climate change also reduces growing seasons, affecting pasture quality. This research aims to evaluate, through a documentary analysis, the accumulation of dry matter, protein and energy in forage plantain, considering climatic variables such as solar radiation, relative humidity and precipitation. The objective of this research is to evaluate, through a documentary analysis, the accumulation of dry matter, protein and energy in fodder plantain, considering climatic variables such as solar radiation, relative humidity and precipitation. A methodology based on literature review of scientific articles published between 2015 and 2025, from databases such as Scopus, ScienceDirect and Web of Science was used, focusing the search on producing countries. The results showed that Colombia presented the most balanced data (3750 kg/ha DM, 153.62 kWh/m² of radiation, 77 % relative humidity and 3240 mm of precipitation), concluding that fodder plantain is a resilient and efficient species in diverse climatic conditions, with a higher productive potential in areas with radiation of 150-200 kWh/m² and precipitation between 1000 and 3000 mm, conditions similar to those of Ecuador.

Keywords: climate change, sustainability, forage production, biomass.

Introducción

La presente revisión bibliográfica recopila el comportamiento del llantén forrajero (*Plantago lanceolata* L.), una especie con gran adaptabilidad y resiliencia a las variaciones agroclimáticas, enfocándose en su respuesta frente a diversos factores ambientales, especialmente la radiación solar y su impacto sobre la acumulación de materia seca.

Yang et al. (2021) subrayan que la radiación solar constituye un factor esencial para el rendimiento de los cultivos, ya que influye directamente en la habilidad de las plantas para absorber energía y maximizar su producción. De manera similar, Zhang et al. (2023) indicaron que optimizar la captación de radiación solar es una estrategia eficaz para incrementar el rendimiento de los cultivos forrajeros para la producción agropecuaria. Tlahig et al. (2024) destacaron la influencia de factores ambientales como la precipitación y la humedad relativa en la calidad de las pasturas, destacando que estas interacciones son determinantes para garantizar altos niveles de calidad en la producción forrajera. Sin embargo, la variabilidad de estos factores asociada al cambio climático ha generado incertidumbre, complicando la planificación y la optimización de la producción forrajera (Bilotto et al., 2024).

En el caso del llantén, se ha documentado que niveles de radiación solar superiores a 150 kWh/m² favorecen un incremento del 35 % en la acumulación de materia seca, en comparación con condiciones de radiación inferiores a 100 kWh/m², evidenciando su alta eficiencia en la captación de energía solar, gracias también a las propiedades de sus bioactivos, que poseen un elevado potencial de absorción de radiación (Murai et al., 2009; Nizioł et al., 2019). Por lo tanto, es imprescindible disponer de datos cuantitativos precisos que permitan modelar el efecto de estas variables sobre la acumulación de materia seca del llantén, especialmente bajo escenarios de alta variabilidad climática, resaltando la relevancia de la radiación solar en el rendimiento y la calidad de los cultivos forrajeros (Gómara et al., 2020). Ojeda et al. (2018), mencionan que los pastos perennes superan a los cultivos anuales bajo condiciones climáticas desfavorables, debido a su mayor capacidad de captar agua y radiación solar, incrementando su productividad.

En este contexto, el llantén forrajero se presenta como una alternativa interesante, no solo por su capacidad de adaptarse a condiciones climáticas cambiantes, sino también por su potencial para reducir la lixiviación de nitrógeno en pastoreo, contribuyendo a la sostenibilidad de los sistemas ganaderos (Eady et al., 2024). Además, de sus características morfofisiológicas y nutricionales, como su contenido de carbohidratos no estructurales superior al del raygrass, el llantén forrajero contiene compuestos bioactivos, con propiedades antibacterianas, antiinflamatorias y antioxidantes (Minneé et al., 2019; Navarrete et al., 2016). Sin embargo, a pesar de sus ventajas, existen escasas investigaciones sobre esta pastura y su comportamiento frente a los factores ambientales, lo que representa una brecha significativa en el conocimiento para optimizar las prácticas de manejo forrajero (De la Rosa et al., 2022). Se ha determinado que una precipitación acumulada de al menos 500 a 700 mm durante el ciclo de crecimiento garantiza un desarrollo óptimo, mientras que déficits hídricos inferiores a 400 mm pueden reducir el rendimiento hasta en un 25 % (Walter et al., 2016).

El llantén forrajero es una alternativa en los sistemas de producción resilientes, dada su capacidad para tolerar diversas condiciones ambientales y su superioridad en contenido nutricional (Pol et al., 2021). Las variables climáticas, como la radiación solar y las precipitaciones, explicaron de manera significativa la variabilidad en la producción de biomasa, así, los resultados sugieren que el llantén podría jugar un papel clave en la seguridad alimentaria y en la adaptación al cambio climático. No obstante, se requieren estudios adicionales para profundizar en su diversidad genética, distribución y extensión en área, así como en su interacción con otros cultivos a nivel mundial y los beneficios derivados de sus compuestos bioactivos en la producción animal.

Finalmente, el llantén forrajero presenta alta resistencia a la sequía, actúa como bioindicador en suelos pobres con metales pesados y posee un alto contenido de minerales esenciales (Ca, Mg, Na), con una retención de Calcio de hasta cuatro veces superior al del raygrass; su digestibilidad es entre un 6 al 20% mayor que la achicoria (Pol et al., 2021; Trail y Ward, 2024; Barrios & Ayala, 2015; DairyNZ, 2024). Además, gracias a su tolerancia a condiciones ambientales adversas, alta palatabilidad y fácil manejo de plagas, se posiciona como una opción óptima para cultivos intensivos (Hodgkinson et al., 2011; Pol et al., 2021; Roumani et al., 2022; Grigore et al., 2015).

Efectos de la Radiación sobre el Crecimiento del Llantén Forrajero

El llantén forrajero presenta una mayor eficiencia frente a la radiación solar, manteniendo tasas fotosintéticas de 8 a 12 $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ incluso bajo estrés hídrico, superando al raygrass perenne, cuyo rango es de 5 y 10 $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ (Golovko et al., 2022; Wilson et al., 2023). En este sentido, diferencias en la disponibilidad de radiación solar que afectan las tasas fotosintéticas, representan un factor clave en la formación de biomasa mediante la conversión de energía luminosa en química y la producción de moléculas orgánicas necesarias para el crecimiento y desarrollo de los cultivos, que junto con otros factores climáticos como la precipitación y la humedad relativa, contribuyen a la heterogeneidad en los recursos agroclimáticos y su influencia en la acumulación de materia seca (Yang et al., 2021; Simkin et al., 2020; Ruíz et al., 2020). Así, una mayor exposición a la radiación solar impulsa la conversión de CO_2 en biomasa, favoreciendo la acumulación de materia seca en hojas y raíces (Yang et al., 2021; Kinoshita et al., 2024).

En este contexto, la eficiencia en el uso de la radiación solar es clave para la productividad forrajera, variando según la planta y el genotipo, así, para las especies C3 este valor oscila entre 0,40 a 2,50 g MS/MJ de radiación fotosintéticamente activa incidente; este rango sugiere que las especies C3 tienen una mayor capacidad para transformar la radiación solar en biomasa, en comparación con otras especies (Nasca et al., 2020). Además, Cifuentes et al. (2020), destacan que los pastizales reciben mayor proporción de radiación solar directa (94%) que otros cultivos (35%), lo que afecta directamente el contenido de agua del suelo. Además, Masiwal et al. (2022) demostraron que la relación entre la humedad relativa y la radiación solar es una manera eficiente de representar las condiciones meteorológicas de cualquier región, considerando que niveles más altos de humedad relativa se registran en zonas donde la temperatura es más alta y cuando la región tiene niveles bajos de radiación solar.

En este sentido, Baeza et al. (2011) utilizaron la fórmula planteada por Monteith para determinar que la producción primaria neta de asimilación (PPNA) está directamente relacionada con la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel (RFAA); la constante de proporcionalidad en esta relación es la eficiencia de conversión de energía radiante en biomasa (EUR), descrito en la siguiente ecuación:

$$\text{PPNA} = \text{EUR} * \text{RFAA} = \text{EUR} * \text{RFA} * \text{fRFAA}$$

Dónde EUR es la eficiencia en el uso de la radiación, RFA, la radiación fotosintéticamente activa que llega a la superficie y fRFAA, la fracción de esa radiación que intercepta efectivamente la vegetación.

En el mismo sentido, la investigación de Suzuki et al. (2023) destaca la relación entre una mayor área foliar, la tasa fotosintética y mejor capacidad para mitigar el estrés UV. Así, en países de Europa, Latinoamérica y Oceanía, durante los veranos y otoños en estas regiones productoras de llantén, los valores de radiación solar son elevados e ideales (150-200 kWh/m²) y la duración del día se extiende entre 14 y 16 horas de luz, proporcionando una mayor disponibilidad de energía para la fotosíntesis (Eady et al., 2024; DairyNZ, 2023). Gómara et al. (2020) observaron en Francia, que el nivel de precipitaciones (867 mm) mitiga el estrés hídrico, clave para el crecimiento de las pasturas,

mientras que la productividad aumenta con el incremento de la temperatura superficial y la radiación solar, condiciones que generalmente se asocian con una reducción en las precipitaciones y la nubosidad. Asimismo, Roumani et al. (2022) documentaron que, en Irán, un nivel de precipitaciones de 228 mm, combinado con una humedad relativa del 73% y una radiación solar de 158.52 kWh/m², favorece una producción promedio de MS de 2300 kg/ha, lo que evidencia la adaptabilidad del llantén forrajero a condiciones áridas. Bajo el mismo contexto, en Polonia, el registro de precipitaciones más elevadas (600 mm) y una humedad relativa del 77% compensan parcialmente la baja radiación solar (92.36 kWh/m²), resultando en una productividad promedio de MS de apenas 990 kg/ha (Roson et al., 2015). En Irlanda, pese a las abundantes precipitaciones (1118 mm) y una humedad relativa del 80%, la limitada radiación solar (82.68 kWh/m²) restringe la producción promedio de MS a 2800 kg/ha, aunque estas condiciones climáticas aseguran un crecimiento estable (Hearn et al., 2024). También, De la Rosa et al. (2022) informaron que, en Nueva Zelanda, una humedad relativa del 70% y una radiación solar de 118.70 kWh/m², junto con precipitaciones anuales de 1732 mm, facilitan una producción promedio de 2600 kg/ha de MS, lo que demuestra su adaptabilidad a condiciones templadas húmedas.

En Bolivia, Montero (2022) reportó que las precipitaciones de 1146 mm, combinadas con una humedad relativa del 70% y una radiación solar moderada (142.98 kWh/m²), permiten alcanzar una producción promedio de MS de 4100 kg/ha, siendo óptima para regiones tropicales; por otra parte, en Colombia, Portillo et al. (2021) señalaron que una alta humedad relativa (77%) y precipitaciones excepcionales (3240 mm), acompañadas de una radiación solar de 153.62 kWh/m², sustentan un rendimiento promedio de 3750 kg/ha de MS, característico de condiciones tropicales húmedas, y para el caso de México, Estevané y Martínez (2023) señalaron que la combinación de una alta radiación solar (191.31 kWh/m²) y una humedad relativa del 70.2%, junto con una precipitación anual de 758 mm, permite alcanzar un rendimiento promedio de 5400 kg/ha de MS, posicionándolo como el valor más alto registrado en los estudios.

Su morfología favorece la captación eficiente de luz solar y asegura un crecimiento sostenido en fases críticas, incluso bajo condiciones de estrés hídrico (Ojeda et al., 2018). Otro aspecto relevante en el estudio del llantén forrajero es su respuesta al impacto de la radiación UV-B, una fracción de la radiación solar, que de acuerdo con Cuadra et al. (2023), en Chile se observó un incremento significativo en variables morfológicas clave del llantén expuesto a esta radiación, donde se destacan un aumento del 59.87 % en el área foliar (de 9.32 cm² a 14.90 cm²), del 30.81 % en la longitud de la hoja (de 8.86 cm a 11.59 cm), del 24.04 % en el ancho de la hoja (de 1.04 cm a 1.29 cm) y del 30.93 % en la altura de la planta (de 9.31 cm a 12.19 cm), evidenciando que la radiación actúa como un estímulo para el crecimiento del llantén, lo cual tiene implicaciones positivas en su productividad como forraje.

Desde un enfoque económico, su incorporación en la alimentación bovina puede aumentar las ganancias de la industria láctea hasta en un 4,3 % y mejorar el rendimiento de sólidos lácteos en 1,02 kg/vaca/día (Doole et al., 2021; Nguyen et al., 2022). Su producción forrajera es superior a la de la achicoria con rendimiento de 2 a 4 t/ha de MS y un incremento de 4,7 durante el verano (Fulkerson et al., 2011; Barrios & Ayala, 2015; Lee et al., 2015). A la vez, optimiza la fermentación ruminal al incrementar la concentración de ácidos grasos volátiles, mejorando la digestión en rumiantes y reforzando la importancia en sistemas agropecuarios sostenibles, destacándose también por su mayor contenido de fibra no estructural en comparación con otras pasturas (Sun et al., 2022; Minneé et al., 2019).

A pesar de estas ventajas, el llantén, como cualquier otro cultivo, enfrenta desafíos asociados a riesgos climáticos y estacionalidad, así, factores como la falta de riego, suelos erosionados y la variabilidad climática no solo afectan su rendimiento, sino que también contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero, lo que complica la sostenibilidad en los sistemas productivos (Halli et al., 2024; Bilotto et al., 2024). Además, estudios como los de Indah et al. (2020) y Gbenou et al.

(2024) evidencian diferencias en el rendimiento de las pasturas según las condiciones regionales, por ejemplo, en zonas tropicales, como México, las pasturas tienden a tener mayor contenido fibroso y menor concentración de proteínas en comparación con regiones subtropicales y áridas, como Nueva Zelanda.

Un aspecto para considerar es la acumulación de compuestos fenólicos, como taninos, en las hojas más viejas del llantén, lo que reduce su palatabilidad y digestibilidad, además de incrementar las emisiones de CH₄ en rumiantes (Roussel et al., 2021; De la Rosa et al., 2022). Estas limitaciones se agravan en contextos de cambio climático, que pueden acortar los periodos de crecimiento y reducir la acumulación de biomasa debido a alteraciones en la asimilación fotosintética (Ma et al., 2024).

Por último, la estacionalidad y la variabilidad climática representan riesgos significativos para los cultivos, pues cambios abruptos en las precipitaciones, por ejemplo, pueden reducir la productividad hasta en un 30 %, siendo estos factores responsables de más de un tercio de la variabilidad global en la productividad agrícola (Fraisse et al., 2024). Aunque históricamente distribuido por sus propiedades medicinales y considerado ocasionalmente como maleza, el llantén ha cobrado interés por sus beneficios agronómicos y su adaptabilidad frente a la estacionalidad de la radiación solar y las precipitaciones, desafíos presentes en todas las regiones agrícolas (Abate et al., 2022; Wang et al., 2015; Alves et al., 2021; Bonifaz et al., 2018).

Propiedades Bioactivas del Llantén Frente a la Radiación Solar

Para Navarrete et al. (2016), Eady et al. (2024), Egan et al. (2025), Nkomboni (2017), Gonçalves et al. (2015) y Grigore et al. (2015), el llantén forrajero contiene varios compuestos bioactivos con potencial para la salud en 2 a 3 %, como glucósidos iridoides, el acteósido y la aucubina y glicósidos feniletanoides como el verbascósido, los cuales se han asociado con la reducción de las pérdidas de nitrógeno en la micción de los rumiantes, indicando que desde un 30% de llantén en la dieta de los animales, reduce significativamente la concentración y, excreción de nitrógeno en la orina, con lo cual se llega a reducir la lixiviación, efecto que modifica la estructura del suelo, reduciendo la superficie específica y porosidad hasta en un 39 % en promedio y 82 % en suelos con buen drenaje debido al incremento en el volumen de orina, puesto que esta pastura posee en promedio un 30 % menos de materia seca que el raygrass perenne, además, sus raíces liberan compuestos secundarios como aucubina, antes mencionada y ácido clorogénico (fenol), con contenido de 38,43 a 70,97 mg de equivalentes de ácido gálico por gramo de peso seco (GAE/g), que inhiben parcialmente las bacterias nitrificantes, lo que reduce la acumulación de nitratos y permite que el pasto absorba nitrógeno por más tiempo (Genc et al., 2019; DairyNZ, 2024; Benguit et al., 2022). Además, Rahamouz et al. (2022), resaltan a las saponinas y fenoles contenidos en el llantén, ya que mejoran la mineralización de nitrógeno en el suelo. Además, las saponinas maximizan la actividad de las bacterias beneficiosas en el rumen y actúan sobre las bacterias productoras de metano, mejorando la absorción de nutrientes, reduciendo la población de microorganismos patógenos y actuando como antiespumantes naturales para prevenir el timpanismo en rumiantes, favoreciendo la salud animal (Roson et al., 2015).

Adicionalmente, Cuadra et al. (2023) obtuvieron datos que demostraron que los compuestos de esta especie presentan bandas de absorción de luz ultravioleta en los rangos de 286 y 331 nm, correspondiente a los ácidos hidroxicinámicos, una clase de metabolitos secundarios que actúan como antioxidantes, que junto a los fenoles, como el ácido clorogénico y el ácido rosmarínico, protegen las células y tejidos del daño causado por los radicales libres, disminuyendo el estrés oxidativo y actuando a nivel celular, neurológico y cutáneo; además, protegen el ADN, las proteínas y las membranas celulares, reduciendo la inflamación, mejorando la función inmunológica y metabólica, y ayudando en la prevención de enfermedades cardiovasculares en los animales (Bahadori et al., 2020; Ramírez et al., 2016; Kodikara et al., 2024).

Materiales y métodos

Para llevar a cabo esta investigación, se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva, abarcando artículos disponibles en bases de datos reconocidas como Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Google Académico, SciELO y Taylor & Francis. Se consideró el período comprendido entre 2015 y la actualidad, asegurando la inclusión de estudios relevantes y actualizados.

La estrategia de búsqueda fue diseñada cuidadosamente utilizando cadenas de búsqueda que combinaron conectores lógicos como AND y OR, junto con palabras clave específicas alineadas con los objetivos del estudio. Entre los términos utilizados destacaron:

1. “Growth rate” (tasa de crecimiento).
2. “Leaf half-life” (vida media de la hoja).

Estas búsquedas se realizaron mediante herramientas como “Find articles with these terms” en ScienceDirect y “Enter keywords, authors, DOI, etc.” en Taylor & Francis. Asimismo, se aplicó el mismo enfoque para identificar investigaciones relevantes en Europa, Latinoamérica, Oceanía y Asia.

Se implementaron criterios rigurosos para garantizar la calidad y relevancia de las fuentes:

Criterios de inclusión:

- Artículos publicados en revistas indexadas y de alto impacto.
- Estudios enfocados en ecofisiología, fotosíntesis y acumulación de biomasa.
- Investigaciones realizadas desde 2015 en adelante.
- Estudios publicados sin restricciones de idioma.

Criterios de exclusión:

- Artículos con información incompleta sobre metodología o resultados.

El proceso de selección se estructuró en tres etapas:

1. Recolección inicial de artículos utilizando las cadenas de búsqueda definidas.
2. Eliminación de artículos duplicados y aquellos no pertinentes tras la revisión de títulos y resúmenes.
3. Evaluación detallada de los textos completos para verificar su relevancia y profundidad.

Los artículos seleccionados, alrededor de 100, se sistematizaron empleando el gestor bibliográfico Mendeley, organizándolos en colecciones temáticas. De ser necesario, los datos se resumieron en tablas para facilitar su interpretación y visualización.

La información recopilada se organizó y analizó considerando:

1. La relación entre la radiación solar y la acumulación de materia seca.
2. Variables ambientales como humedad relativa, precipitación y temperatura.
3. La adaptabilidad y el rendimiento del llantén en distintas regiones geográficas.

Este trabajo adoptó un enfoque riguroso y sistemático, diseñado para desarrollar una revisión bibliográfica integral que proporciona un marco conceptual sólido y relevante para el

estudio. Se priorizó la calidad y pertinencia de los hallazgos para garantizar la utilidad de los resultados obtenidos.

Resultados y discusión

A continuación, se analiza la influencia de la radiación solar en la acumulación de materia seca y composición nutricional del llantén forrajero bajo diversas condiciones climáticas, durante un periodo determinado, presentadas mediante tablas y figuras, en regiones de Europa, Asia, Oceanía y América Latina.

Tabla 1.
Promedio de la composición nutricional del llantén forrajero en Europa, Asia y Oceanía, en el periodo del 2017 al 2023, frente a la Radiación solar

Ubicación	MS kg/ha	PC %	EN Mcal/kg	Radiación solar KhW/m2
<i>Irán</i>	2200-2400	20-22	2.61-2.8	158.52
<i>Nueva Zelanda</i>	1350-1500	20-22	2.6-2.9	118.70
<i>Irlanda</i>	2900-2700	18-20	2.65-2.7	82.68
<i>Polonia</i>	980-1000	18-20	2.55-2.8	92.36

Nota. El contenido de materia seca (MS) en kg/ha, proteína cruda (PC) en % y energía neta (EN) en Mcal/kg se presentan en relación con la radiación solar (kWh/m2) en Irán, Nueva Zelanda, Irlanda y Polonia. Datos adaptados de Roumani et al. (2022), De la Rosa et al. (2022), Roson et al. (2015), Hearn et al. (2024) y European Commission, (2016).

Tabla 2.
Promedio de la composición nutricional del llantén forrajero en Europa, Asia y Oceanía, en el periodo del 2017 al 2021, frente a las precipitaciones

Ubicación	MS kg/ha	PC %	EN Mcal/kg	Precipitación mm
<i>Irán</i>	2200-2400	20-22	2.61-2.8	228
<i>Nueva Zelanda</i>	1350-1500	20-22	2.6-2.9	1732
<i>Irlanda</i>	2900-2700	18-20	2.65-2.7	1118
<i>Polonia</i>	980-1000	18-20	2.55-2.8	600

Nota. El contenido de materia seca (MS) en kg/ha, proteína cruda (PC) en %, y energía neta (EN) en Mcal/kg se presentan en relación con las precipitaciones en Irán, Nueva Zelanda, Irlanda y Polonia. Datos adaptados de Roumani et al. (2022), De la Rosa et al. (2022), Roson et al. (2015), Hearn et al. (2024) y Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2021).

Tabla 3.
Promedio de la composición nutricional del llantén forrajero en Europa, Asia y Oceanía, en el periodo del 2017 al 2023, frente a la humedad relativa

Ubicación	MS kg/ha	PC %	EN Mcal/kg	Humedad relativa %
Irán	2200-2400	20-22	2.61-2.8	73
Nueva Zelanda	1350-1500	20-22	2.6-2.9	70
Irlanda	2900-2700	18-20	2.65-2.7	80
Polonia	980-1000	18-20	2.55-2.8	77

Nota. El contenido de materia seca (MS) en kg/ha, proteína cruda (PC) en %, y energía neta (EN) en Mcal/kg se presentan en relación con la humedad relativa en Irán, Nueva Zelanda, Irlanda y Polonia. Datos adaptados de Roumani et al. (2022), De la Rosa et al. (2022), Roson et al. (2015), Hearn et al. (2024).

Las tablas muestran cómo Irlanda se posiciona como la región con mayor producción de materia seca, superando en aproximadamente un 16% a Irán y en un 50% a Nueva Zelanda, mientras que Polonia exhibe los valores más bajos, representando una reducción del 64% en contraste con Irlanda, esto se atribuye a las diferencias de latitud, las cuales influyen directamente en la cantidad y la distribución de la radiación solar (Bautista, 2016). Además, para el caso de Irlanda, la influencia del océano Atlántico desempeña un papel fundamental en el comportamiento del clima, moderando las temperaturas y evitando los extremos climáticos que son comunes en otros países con latitudes semejantes (Met Éireann, 2019). A pesar de que Irán cuenta con la mayor radiación solar e Irlanda con la menor, esta última alcanza una producción notablemente superior de materia seca, lo que sugiere que otros factores como la precipitación y la humedad relativa desempeñan un papel determinante. Por su parte, Nueva Zelanda, con la mayor precipitación registrada de 1732 mm, no refleja niveles elevados de materia seca, indicando que esta variable no tiene influencia significativa sobre su acumulación. Polonia, con precipitaciones moderadas y una humedad relativa alta, mantiene los valores más bajos en producción de materia seca, destacando la influencia multifactorial de las condiciones edáficas sobre el rendimiento del llantén forrajero (Gao et al., 2020). Asimismo, Miszalski et al. (2023) señalaron que se ha visto mayor eficiencia del llantén forrajero en el uso del agua en la época estival, explicando el comportamiento registrado en Irlanda por su estacionalidad.

Tabla 4.
Promedio de la composición nutricional del llantén forrajero en Latinoamérica y el Caribe, en el periodo del 2017 al 2023, frente a la Radiación solar

Ubicación	MS kg/ha	PC %	EN Mcal/kg	Radiación solar KWh/m ²
Colombia	3500-4000	17-19	1,5-1,7	153,62

<i>Bolivia</i>	3800-4400	12-14	1.6-1.9	142,98
<i>México</i>	5000-5800	15-17	1.9-2.2	191,31

Nota. El contenido de materia seca (MS) en kg/ha, proteína cruda (PC) en %, y energía neta (EN) en Mcal/kg se presenta en relación con la radiación solar en Colombia, Bolivia y México. Datos adaptados de European Commission (2016), Portillo et al. (2019), Portillo et al. (2021), Montero (2022) y Estevané y Martínez (2023).

Tabla 5.
Promedio de la composición nutricional del llantén forrajero en Latinoamérica y el Caribe en el periodo del 2017 al 2021 frente a las precipitaciones

Ubicación	MS kg/ha	PC %	EN Mcal/kg	Precipitación mm
<i>Colombia</i>	3500-4000	17-19	1,5-1,7	3240
<i>Bolivia</i>	3800-4400	12-14	1.6-1.9	1146
<i>México</i>	5000-5800	15-17	1.9-2.2	758

Nota. El contenido de materia seca (MS) en kg/ha, proteína cruda (PC) en %, y energía neta (EN) en Mcal/kg se presenta en relación con las precipitaciones en Colombia, Bolivia y México. Datos adaptados de FAO (2021), Portillo et al. (2019), Portillo et al. (2021), Montero (2022) y Estevané y Martínez (2023).

Tabla 6.
Promedio de la composición nutricional del llantén forrajero en Latinoamérica y el Caribe en el periodo del 2017 al 2023 frente a la humedad relativa

Ubicación	MS kg/ha	PC %	EN Mcal/kg	Humedad relativa %
<i>Colombia</i>	3500-4000	17-19	1,5-1,7	77
<i>Bolivia</i>	3800-4400	12-14	1.6-1.9	70
<i>México</i>	5000-5800	15-17	1.9-2.2	70.2

Nota. El contenido de materia seca (MS) en kg/ha, proteína cruda (PC) en %, y energía neta (EN) en Mcal/kg se presenta en relación con la humedad relativa en Colombia, Bolivia y México. Datos adaptados de Portillo et al. (2019), Portillo et al. (2021), Montero (2022) y Estevané y Martínez (2023).

El análisis revela que México lidera en producción de materia seca, superando en promedio a Colombia y Bolivia en un 42,5% y 24,2%, respectivamente, debido a su alta radiación solar, que potencia los procesos fotosintéticos, aunque con el aumento de las temperaturas y la humedad,

los tejidos vegetales pueden volverse más lignificados, lo que dificulta su digestión y disminuye la disponibilidad de nutrientes (Van der Spiegel et al., 2012). En contraste, Colombia destaca por el mayor contenido de proteína cruda, entre un 13% y 37% superior al de Bolivia y un 11% y 21% mayor al de México, favorecido por las altas precipitaciones que incrementan la humedad del suelo resultando en una mayor disponibilidad de nitrógeno en el suelo (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMANART), 2015;Li et al., 2021). Además, México registra el mayor contenido de energía neta, con promedios de 34% más que Colombia y 19% más que Bolivia, lo que refleja una mayor acumulación de compuestos energéticos bajo condiciones de alta radiación y menor precipitación, sin embargo, en cuanto a la humedad relativa, su interacción con factores como la radiación y las precipitaciones influye en la calidad nutricional del forraje, destacando a Colombia por su balance favorable entre cantidad y calidad (Portillo et al., 2019). Así, Fraisse et al. (2024) resaltan que la acumulación de biomasa en el llantén forrajero depende de la radiación solar y las precipitaciones: la primera, impulsando la fotosíntesis y la fijación de carbono, mientras que la segunda garantiza la disponibilidad de agua para los procesos fisiológicos. Esta interacción, junto con factores como la humedad relativa, determina la tasa de crecimiento y la producción de biomasa, como lo muestran las tablas para Latinoamérica y el Caribe, así, las diferencias climáticas, tipos de suelo y latitud explican las variaciones significativas en la composición nutricional entre Colombia, Bolivia y México, donde los niveles de materia seca, proteína cruda y energía neta aumentan gradualmente al pasar de Colombia a México (Desonie, 2025). Por último, Newman et al. (2024) enfatizan que la calidad de un forraje no depende solo de su contenido de proteína, energía y fibra, sino también de su influencia en el rendimiento animal, tanto en producción de leche como de carne.

Tabla 7.
Promedio de la composición nutricional del llantén forrajero en el mundo, en el periodo del 2017 al 2023, frente a la humedad relativa

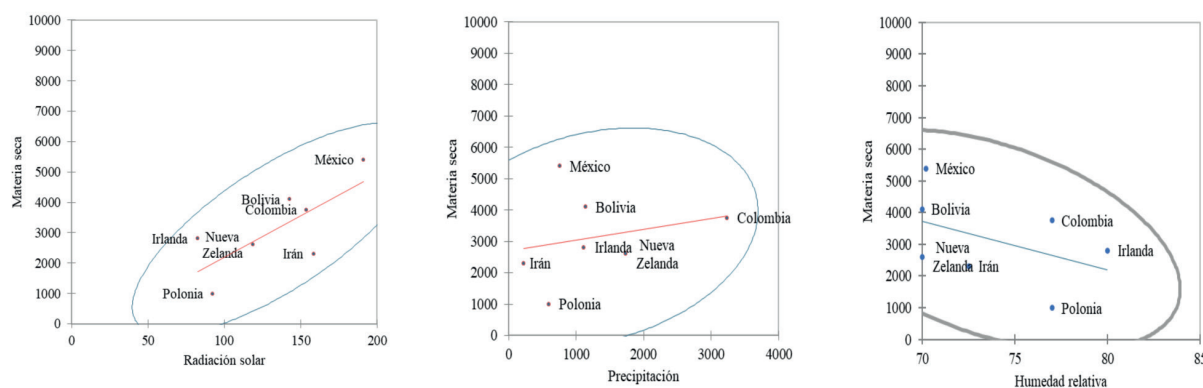
Ubicación	MS promedio kg/ha	Radiación solar kWh/m2	Humedad relativa %	Precipitación mm
<i>Irán</i>	2300	158.52	73	228
<i>Polonia</i>	990	92.36	77	600
<i>México</i>	5400	191,31	70.2	758
<i>Irlanda</i>	2800	82.68	80	1118
<i>Bolivia</i>	4100	142,98	70	1146
<i>Nueva Zelanda</i>	2600	118.70	70	1732
<i>Colombia</i>	3750	153,62	77	3240

Nota. El contenido de materia seca (MS) en kg/ha, proteína cruda (PC) en %, y energía neta (EN) en Mcal/kg se presenta en relación con la humedad relativa en el mundo. Datos adaptados de Portillo et al. (2019), Portillo et al. (2021), Montero (2022), Estevané y Martínez (2023), FAO (2021), European Commission (2016), Roumani et al. (2022), De la Rosa et al. (2022), Roson et al. (2015), Hearn et al. (2024).

La tabla muestra cómo los valores de materia seca se presentan directamente proporcionales a la radiación solar, destacando su influencia como el principal factor ambiental en la acumulación de biomasa; la humedad relativa, aunque con menor peso, contribuye al equilibrio hídrico y al intercambio gaseoso, esenciales para el crecimiento de las pasturas; esta relación se evidencia en México, donde altos niveles de radiación solar y materia seca coinciden con una humedad relativa moderada y precipitaciones equilibradas. En Nueva Zelanda, la correlación entre radiación solar y materia seca es significativa, con precipitaciones promedio que favorecen condiciones estables. Sin embargo, Colombia presenta los niveles más balanceados entre las variables ambientales y la acumulación de materia seca, con altos valores que se encuentran dentro de los rangos ideales para el llantén forrajero. México acumula un 31.7 % más de materia seca que Bolivia y un 44 % más que Colombia, mientras que Bolivia supera a Colombia en un 9.3 %. Pese a esto, la calidad de la biomasa podría ser mayor en Bolivia y Colombia debido a que, el rendimiento de materia seca y las cualidades del forraje no siempre están relacionados, lo que sugiere que altos valores de esta, no siempre impliquen una calidad superior del forraje como se evidencia en México, posicionándolos como referencias óptimas para aprovechar las condiciones agroclimáticas de Ecuador y optimizar la producción forrajera de calidad, al considerar tanto cantidad como estabilidad ambiental (Bhattarai et al., 2010).

Figura 1.

Materia seca promedio en función de la radiación solar, humedad relativa y precipitación a nivel global, en el periodo del 2017 al 2023



La figura evidencia una relación positiva entre la radiación solar y la acumulación de materia seca, donde México presenta los valores más altos en ambos aspectos, lo que refleja condiciones óptimas para el aprovechamiento de la radiación; Colombia se ubica en un nivel intermedio, con un rendimiento moderado, mientras que Irlanda, Polonia y Nueva Zelanda, con menor radiación solar, muestran acumulaciones más bajas, Irán por su parte, aunque presenta radiación media-alta, registra baja producción de materia seca, posiblemente debido a factores ambientales o de manejo (Rudniak, 2020). La elipse de dispersión confirma esta tendencia general, destacando diferencias en la eficiencia del uso de la radiación según las condiciones locales.

Respecto a la humedad relativa, no se observa una correlación positiva significativa, ya que la pendiente de la línea de tendencia es negativa; México y Bolivia mantienen altos valores de materia seca con niveles moderados de humedad relativa, sugiriendo que la radiación solar influye en su productividad. En contraste, Nueva Zelanda, Irán y Polonia, con baja acumulación de materia seca y humedad relativa moderada, podrían estar limitados por otros factores como la precipitación; la

elipse de dispersión refleja que, aunque la humedad relativa influye parcialmente, su impacto es secundario y depende de su interacción con otras variables.

La correlación entre la precipitación y la acumulación de materia seca es débilmente positiva, como lo indica la pendiente levemente ascendente de la línea de tendencia. Colombia, con altos valores de materia seca y precipitación, sugiere que un nivel elevado de precipitaciones favorece su productividad. México y Bolivia, con precipitaciones moderadas, logran altos niveles de materia seca gracias a la alta radiación solar. Por otro lado, Irlanda y Nueva Zelanda mantienen un equilibrio moderado entre precipitación y acumulación de materia seca. Polonia e Irán, con bajos niveles de precipitación, muestran una acumulación limitada, probablemente por restricciones en la disponibilidad de agua. La elipse de dispersión subraya que la interacción entre precipitación y otras variables climáticas es clave para la productividad de materia seca.

En este contexto, estudios de Kinoshita et al. (2024) destacan que el rendimiento de los cultivos está estrechamente ligado a la captación de radiación solar, una idea que se refleja en esta investigación. De manera similar, Zhang et al. (2023) subrayan la importancia de optimizar esta captación para mejorar el rendimiento de los cultivos, pues determinar el punto de mayor captación de radiación es clave para mitigar la escasez de bioenergía y forraje en la producción agropecuaria. Por otro lado, Ojeda et al. (2018) afirman que la retención de agua en el suelo es esencial para el adecuado establecimiento inicial de los cultivos, aunque la eficiencia en la captación solar depende de un desarrollo foliar adecuado. En este sentido, Yang et al. (2021) coinciden al señalar que la radiación solar es crucial para la productividad de las plantas, ya que afecta directamente su capacidad para capturar energía. Coblenz et al. (2018) añaden que, en ciertas estaciones del año, la acumulación de materia seca se ve afectada por un insuficiente desarrollo foliar y una menor capacidad de captación de luz, lo que limita el crecimiento en primavera. A su vez, Zhu et al. (2023) observan que la siembra en función del clima en pasturas puede mejorar el desarrollo de tallos y hojas, aunque podría reducir la cantidad de material más tierno y palatable, lo que también fue observado por Zhang et al. (2019) en forrajeras anuales.

Asimismo, Liu et al. (2023) indican que los forrajes tolerantes al estrés climático pueden prolongar la fotosíntesis e incrementar la acumulación de materia seca. Tlahig et al. (2024) subrayan esta idea al señalar que la calidad del forraje está influenciada por factores ambientales como la radiación solar, precipitación y humedad relativa. En este mismo contexto, Medina-van Berkum et al. (2024) destacan la capacidad del llantén forrajero para ajustarse a diversas condiciones ambientales, lo que resalta su plasticidad fenotípica y adaptativa. Finalmente, Giridhar y Samireddypalle (2015) señalan que los países en desarrollo son más vulnerables al cambio climático debido a su dependencia de la agricultura y recursos limitados, lo que les dificulta adoptar nuevas tecnologías que mitiguen estos efectos. Sin embargo, resulta crucial abordar la brecha existente en los datos y estudios sobre la influencia directa de la radiación solar en el llantén forrajero bajo diversas condiciones ambientales; la obtención de esta información permitirá una planificación y optimización más eficiente de los recursos. Cabe destacar que esta investigación, en el marco de producción forrajera y eficiencia agroclimática, requiere avanzar hacia el desarrollo de estudios adicionales de carácter exploratorio y experimental, que permitan posteriormente su proyección hacia una fase de implementación.

Conclusiones

El llantén forrajero se distingue por su mayor tolerancia a condiciones de estrés meteorológico y su alto contenido de carbohidratos solubles en comparación con otras pasturas, beneficiando a los animales en pastoreo. Así, la radiación solar, especialmente en un rango de 150-200 kWh/m², tiene un impacto significativo en la acumulación de biomasa, y las precipitaciones en un rango de 500 mm hasta 3240 mm anuales, apoyan este efecto, finalmente, la humedad relativa tiene una participación en segundo plano.

El llantén forrajero es una pastura con alta tolerancia al estrés climático, prolongando la fotosíntesis y promoviendo la acumulación de materia seca, alcanzando así tasas fotosintéticas de hasta 12 $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$, incluso bajo condiciones de estrés hídrico. Esta capacidad de adaptación resulta fundamental, dado que el desempeño de los cultivos depende en gran medida de su habilidad para captar la radiación solar. Determinar el nivel óptimo de absorción lumínica resulta crucial para enfrentar la escasez de bioenergía y forraje en los sistemas productivos agropecuarios, por tanto, la fuerte dependencia al sector primario y las restricciones tecnológicas limitan la implementación de acciones eficaces ante el cambio climático.

La interacción multifactorial entre radiación solar, precipitación y humedad relativa define la productividad del llantén forrajero, favoreciendo especialmente su desarrollo en regiones donde estos factores se presentan de manera equilibrada; sin embargo, una mayor acumulación de materia seca no se traduce automáticamente en una mejora de la calidad nutricional del forraje, lo que enfatiza la necesidad de un análisis integral de sus características fisicoquímicas y bromatológicas para establecer con precisión su aptitud como recurso alimenticio en sistemas de producción pecuaria.

Recomendaciones

Se sugiere profundizar las investigaciones sobre el llantén forrajero para explorar su diversidad genética, evaluar su interacción con otros cultivos, analizar los beneficios de su contenido bioactivo en la producción pecuaria y realizar estudios de la digestibilidad de la pastura. Además, es importante realizar estudios técnicos en el Ecuador, considerando el comportamiento registrado en Colombia y las semejanzas en cuanto a latitud y clima que presentan estos países, recordando que los valores de materia seca no indican directamente el comportamiento nutricional de las pasturas en los sistemas pecuarios.

Referencias

- Abate, L., Bachheti, R. K., Tadesse, M. G., & Bachheti, A. (2022). Ethnobotanical Uses, Chemical Constituents, and Application of *Plantago lanceolata* L. *Journal of Chemistry*, 2022, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2022/1532031>
- Alves, J., Ribeiro, A., Paiva, Y., Araujo, R., & Brown, S. (2021). Carbon uptake and water vapor exchange in a pasture site in the Brazilian Cerrado. *Journal of Hydrology*, 594, 125943. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125943>
- Baeza, S., Paruelo, J., & Ayala, W. (2011). *Eficiencia en el uso de la radiación y productividad primaria en recursos forrajeros del este de Uruguay*. 15.
- Bahadori, M. B., Sarikurcu, C., Kocak, M. S., Calapoglu, M., Uren, M. C., & Ceylan, O. (2020). *Plantago lanceolata* as a source of health-beneficial phytochemicals: Phenolics profile and antioxidant capacity. *Food Bioscience*, 34. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100536>
- Barrios, E., & Ayala, W. (2015). *Utilización de Plantago lanceolata en la alimentación de corderos en el período estival*.
- Bautista, I. (2016). *Cálculo de la radiación solar extraterrestre en función de la latitud y la declinación solar*.
- Benguit, A., Tiwari, B., Drogui, P., & Landry, D. (2022). Tertiary treatment of a mixture of composting and landfill leachates using electrochemical processes. *Chemosphere*, 292. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133379>
- Bhattarai, K., Bushman, S., Johnson, D., & Carman, J. (2010). Phenotypic and Genetic Characterization of Western Prairie Clover Collections From the Western United States. *Rangeland Ecology & Management*, 63(6), 696–706. <https://doi.org/10.2111/REM-D-10-00008.1>
- Bilotto, F., Harrison, M., Vibart, R., Mackay, A., Christie, K., Ferreira, C., Cottrell, R., Forster, D., & Chang, J. (2024). Towards resilient, inclusive, sustainable livestock farming systems. In *Trends in Food Science and Technology* (152). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104668>
- Bonifaz, N., León, R., & Gutiérrez, F. (2018). *Pastos y forrajes del Ecuador Siembra y producción de pasturas Pastos y forrajes del Ecuador*.
- Cifuentes, L., Moreno Hurtado, F., Diego León-Peláez, J., & Paz, H. (2020). Drought resistance traits predict tree species performance in a humid tropical landscape, but their importance shifts between managed cover types. *Forest Ecology and Management*, 468. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118160>
- Coblentz, W. K., Akins, M. S., Kalscheur, K. F., Brink, G. E., & Cavadini, J. S. (2018). Effects of growth stage and growing degree day accumulations on triticale forages: 1. Dry matter yield, nutritive value, and in vitro dry matter disappearance. *Journal of Dairy Science*, 101(10), 8965–8985. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14868>
- Cuadra, P., Niculcar, R., & Fajardo, V. (2023). Efectos de la radiación UV-B sobre la morfología, los compuestos absorbentes de UV-B y el contenido de pigmentos fotosintéticos de *Plantago lanceolata* y *Rheum rhubarbarum*. *Botánica Gayana*, 80, 38–48.
- DairyNZ. (2023). *Llantén: Manejo del pastoreo lechero*.

- De la Rosa, M., Sandoval, E., Luo, D., Pacheco, D., & Jonker, A. (2022). Effect of feeding fresh forage plantain (*Plantago lanceolata*) or ryegrass-based pasture on methane emissions, total-tract digestibility, and rumen fermentation of nonlactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 105(8), 6628–6638. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21757>
- Desonie, D. (2025, January 2). *Efectos de la Latitud en el Clima*.
- Diairy, NZ. (2024). *Plantago*.
- Doole, G., Romera, A., Leslie, J., Chapman, D., Pinxterhuis, I., & Kemp, P. (2021). Economic assessment of plantain (*Plantago lanceolata*) uptake in the New Zealand dairy sector. *Agricultural Systems*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103012>
- Eady, C., Conner, A., Rowarth, J., Coles, G., Deighton, M., & Moot, D. (2024). An examination of the ability of plantain (*Plantago lanceolata* L.) to mitigate nitrogen leaching from pasture systems. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 1–28. <https://doi.org/10.1080/00288233.2024.2373220>
- Egan, A., Moloney, T., Murphy, J. B., & Forrestal, P. J. (2025). Ribwort plantain inclusion reduces nitrate leaching from grass-clover swards; A multi-year five soil study. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 380. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109376>
- Estevané, E., & Martínez, P. (2023). *Desempeño agronómico de cuatro especies forrajeras crecidas sobre un suelo degradado y en seco*. Universidad Autónoma Chapingo.
- European Commission. (2016, January 11). *Photovoltaic Geographical Information System*. European Union.
- Fraisse, C. W., Guindin, N., Karrei, M., Cerbaro, V., & Lazzaretti, A. (2024). CIFA: A roadmap for services to monitor weather extremes affecting agriculture under a changing climate. *Climate Services*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2024.100506>
- Fulkerson, B., Griffiths, N., & Beale, P. (2011). Brassicas forrajeras para la producción de leche en otoño/invierno. *Primefacts*, 3–11.
- Gao, J., Liu, Z., Zhao, B., Dong, S., Liu, P., & Zhang, J. (2020). Shade stress decreased maize grain yield, dry matter, and nitrogen accumulation. *Agronomy Journal*, 112(4), 2768–2776. <https://doi.org/10.1002/agj2.20140>
- Gbenou, G., Assouma, M., Bastianelli, D., Kiendrebeogo, T., Bonnal, L., Zampaligre, N., Bois, B., Sanogo, S., Sib, O., Martin, C., & Dossa, L. (2024). Enteric methane emissions from zebu cattle are influenced by seasonal variations in rangeland fodder quality and intake. *Animal*, 101320. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101320>
- Genc, Y., Harput, U. S., & Saracoglu, I. (2019). Active compounds isolated from *Plantago subulata* L. via wound healing and antiinflammatory activity guided studies. *Journal of Ethnopharmacology*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2019.112030>
- Giridhar, K., & Samireddypalle, A. (2015). Impact of Climate Change on Forage Availability for Livestock. In Springer (Ed.), *Climate Change Impact on Livestock: Adaptation and Mitigation* (pp. 97–112). Springer India. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2265-1_7
- Golovko, T., Zakhozhiy, I., Shelyakin, M., Silina, E., Tabalenkova, G., Malyshev, R., & Dalke, I. (2022). Photosynthesis, Respiration, and Thermal Energy Dissipation in Leaves of Two Phenotypes

- of *Plantago media* L. under Environmental Conditions. *Russian Journal of Plant Physiology*, 69(6). <https://doi.org/10.1134/S1021443722060085>
- Gómara, I., Bellocchi, G., Martin, R., Rodríguez, B., & Ruiz, M. (2020). Influence of climate variability on the potential forage production of a mown permanent grassland in the French Massif Central. *Agricultural and Forest Meteorology*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107768>
- Gonçalves, S., Grevenstuk, T., Martins, N., & Romano, A. (2015). Antioxidant activity and verbascoside content in extracts from two uninvestigated endemic *Plantago* spp. *Industrial Crops and Products*, 65, 198–202. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.12.011>
- Grigore, A., Bubueanu, C., Pirvu, L., Ionita, L., & Toba, J. (2015). Cultivos de *Plantago lanceolata* L. fuente de materia prima valiosa para diversas aplicaciones industriales. *Agronomía*, 58.
- Halli, H., Govindasamy, P., Wasnik, V., Shivakumar, B., Swami, S., Choudhary, M., Yadav, V., Singh, A., Raghavendra, N., Govindasamy, V., Chandra, A., & Reddy, K. S. (2024). Climate-smart deficit irrigation and nutrient management strategies to conserve energy, greenhouse gas emissions, and the profitability of fodder maize seed production. *Journal of Cleaner Production*, 442. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140950>
- Hearn, C., Egan, M., Lynch, M., Dolan, K., Flynn, D., & O'Donovan, M. (2024). Can the inclusion of ribwort plantain or chicory increase the seasonal and annual dry matter production of intensive dairy grazing swards? *European Journal of Agronomy*, 152. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127020>
- Hodgkinson, S. M., Cárcamo, A., & López, I. (2011). Selective grazing of *Lolium perenne* and *Plantago lanceolata* by growing European wild boar (*Sus scrofa* L.) in a semi-extensive system. *Livestock Science*, 140(1–3), 268–274. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2011.04.003>
- Indah, A., Permana, I., & Despal. (2020). Determinación de la digestibilidad de la materia seca de forrajes tropicales utilizando la composición de nutrientes. *Ciencias de La Tierra y Del Medio Ambiente*. <https://doi.org/10.1088/17551315/484/1/012113>
- Kinoshita, T., Hayashi, T., Yamauchi, D., & Yamamoto, T. (2024). Quantitative analysis of factors affecting bulb yield in terms of dry matter production across different planting dates and cultivars in spring-sown onions. *Scientia Horticulturae*, 338. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113726>
- Kodikara, C., Netticadan, T., Bandara, N., Wijekoon, C., & Sura, S. (2024). A new UHPLC-HRMS metabolomics approach for the rapid and comprehensive analysis of phenolic compounds in blueberry, raspberry, blackberry, cranberry and cherry fruits. *Food Chemistry*, 445. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138778>
- Lee, J., Hemmingson, N., Minnee, E., & Clark, C. (2015). Management strategies for chicory (*Cichorium intybus*) and plantain (*Plantago lanceolata*): Impact on dry matter yield, nutritive characteristics and plant density. *Crop and Pasture Science*, 66(2), 168–183. <https://doi.org/10.1071/CP14181>
- Li, L., Kang, X., Biederman, J. A., Wang, W., Qian, R., Zheng, Z., Zhang, B., Ran, Q., Xu, C., Liu, W., Che, R., Xu, Z., Cui, X., Hao, Y., & Wang, Y. (2021). Nonlinear carbon cycling responses to precipitation variability in a semiarid grassland. *Science of the Total Environment*, 781. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147062>

- Liu, G., Yang, Y., Guo, X., Liu, W., Xie, R., Ming, B., Xue, J., Wang, K., Li, S., & Hou, P. (2023). A global analysis of dry matter accumulation and allocation for maize yield breakthrough from 1.0 to 25.0 Mg ha⁻¹. *Resources, Conservation and Recycling*, 188.
- Ma, Q., You, Y., Shen, Y., & Wang, Z. (2024). Adjusting sowing window to mitigate climate warming effects on forage oats production on the Tibetan Plateau. *Agricultural Water Management*, 293. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108712>
- Masiwal, R., Sharma, C., Ranjan, A., Radhakrishnan, S. R., Shukla, D. K., Bambal, V. K., & Uniyal, S. K. (2022). Long-term variability of trace gases over the Indian Western Himalayan Region. *Science of the Total Environment*, 806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150127>
- Medina-van Berkum, P., Schmöckel, E., Bischoff, A., Carrasco, N., Catford, J. A., Feldmann, R., Groten, K., Henry, H. A., Bucharova, A., Hänniger, S., Luong, J., Meis, J., Oetama, V., Pärtel, M., Power, S., Vilellas, J., Welk, E., Wingler, A., Rothe, B., ... Unsicker, S. (2024). Plant geographic distribution influences chemical defences in native and introduced *Plantago lanceolata* populations. *Functional Ecology*, 38(4), 883–896. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.14535>
- Met Éireann. (2019). *Clima de Irlanda*. Met Éireann.
- Minneé, E. M. K., Kuhn-Sherlock, B., Pinxterhuis, I. J. B., & Chapman, D. F. (2019). Meta-analyses comparing the nutritional composition of perennial ryegrass (*Lolium perenne*) and plantain (*Plantago lanceolata*) pastures. *Journal of New Zealand Grasslands*, 81, 117–124. <https://doi.org/10.33584/jnzg.2019.81.402>
- Miszalski, Z., Kaszycki, P., Śliwa-Cebula, M., Kaczmarczyk, A., Gieniec, M., Supel, P., & Kornaś, A. (2023). Plasticity of *Plantago lanceolata* L. in Adaptation to Extreme Environmental Conditions. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(17). <https://doi.org/10.3390/ijms241713605>
- Montero, J. (2022). Relación de la radiación solar con la producción de plantas: agroproductivas. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 9(1), 52–66. <https://doi.org/10.53287/oqym7033yy88k>
- Murai, Y., Takemura, S., Takeda, K., Kitajima, J., & Iwashina, T. (2009). Altitudinal variation of UV-absorbing compounds in *Plantago asiatica*. *Biochemical Systematics and Ecology*, 37(4), 378–384. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2009.07.005>
- Nasca, J., Berone, G., Arroquy, J., Feldkamp, C., & Colombatto, D. (2020). Evaluación de un modelo de producción de pasturas mediante pruebas empíricas. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 46, 88–95.
- Navarrete, S., Kemp, P., Pain, S., & Back, P. (2016). Bioactive compounds, aucubin and acteoside, in plantain (*Plantago lanceolata* L.) and their effect on in vitro rumen fermentation. *Animal Feed Science and Technology*, 222, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.10.008>
- Newman, Y., Lambert, B., & Muir, J. (2024). *Defining Forage Quality Subtitle: Nutritive Value of Southern Forages*.
- Nguyen, T. T., Navarrete, S., Horne, D. J., Donaghy, D. J., & Kemp, P. D. (2022). Forage plantain (*Plantago lanceolata* L.): Meta-analysis quantifying the decrease in nitrogen excretion, the increase in milk production, and the changes in milk composition of dairy cows grazing pastures containing plantain. In *Animal Feed Science and Technology* (285). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115244>

- Nizioł, Z., Gawel, K., Rybczyńska, K., Jakubczyk, A., Karaś, M., & Bujak, T. (2019). Biochemical properties, UV-protecting and fibroblast growth-stimulating activity of *Plantago lanceolata* L. extracts. *Industrial Crops and Products*, 138, 111453. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.06.016>
- Nkomboni, D. (2017). *Effect of plantain (Plantago lanceolata L.) proportion in the diet on nitrogen use, milk production and behaviour of lactating dairy cows*. Lincoln University.
- Ojeda, J., Caviglia, O., Agnusdei, M., & Errecart, P. (2018). Forage yield, water- and solar radiation-productivities of perennial pastures and annual crops sequences in the south-eastern Pampas of Argentina. *Field Crops Research*, 221, 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.02.010>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2021). *Promedio detallado de precipitaciones (mm anuales)*. Banco Mundial.
- Pol, M., Schmidtke, K., & Lewandowska, S. (2021). *Plantago lanceolata*: una descripción general de sus valiosas propiedades agronómicas y curativas. *Agricultura Abierta*, 6. <https://doi.org/10.1515/opag20210035>
- Portillo, P., Meneses, D., Lagos, E., Duter, M., & Castro, E. (2021). Adaptation of fodder mixtures at different levels of amendment and irrigation in Nariño, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 32(2), 538–555. <https://doi.org/10.15517/am.v32i2.41265>
- Portillo, P., Meneses, D., Morales, S., Cadena, M., & Castro, E. (2019). Evaluación y selección de especies forrajeras de gramíneas y leguminosas en Nariño, Colombia. *Pastos y forrajes*, 42.
- Rahamouz, S., Bagheri, K., Sharafi, A., Tavakolizadeh, M., & Mohsen, N. (2022). Phytochemical screening and Cytotoxicity assessment of *Plantago lanceolata* L. root extracts on Colorectal cancer cell lines and Brine shrimp larvae and determination of the median lethal dose in mice. *South African Journal of Botany*, 149, 740–747. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.06.058>
- Ramírez, L., Rea, A., & Karaben, V. (2016). Llantén: propiedades y usos medicinales. *Revista Facultad de Odontología*.
- Roson, W., Gontar, U., & Kosakowska, O. (2015). Rendimiento y calidad de la hierba de plantago (*Plantago major* L.) en el segundo año de cultivo. *Horticultura y Arquitectura Paisajística*.
- Roumani, A., Biabani, A., Rahemi Karizaki, A., & Alamdari, E. G. (2022). Foliar salicylic acid application to mitigate the effect of drought stress on isabgol (*Plantago ovata* forssk). *Biochemical Systematics and Ecology*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2022.104453>
- Roussel, J., Bardot, V., Berthomier, L., Cotte, C., Dubourdeaux, M., Holowacz, S., & Bernard, P. (2021). Application of the Life Cycle Management of Analytical methods concept to a HPTLC-DPPH assay method for acteoside content in industrial extracts of *Plantago lanceolata* L. *Revista de Cromatografía*, 1181.
- Rudniak, J. (2020). Comparison of local solar radiation parameters with data from a typical meteorological year. *Thermal Science and Engineering Progress*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100465>
- Ruiz, J., Medina, G., González, I., Flores, H., Ramírez, G., Ortiz, C., Byerly, K., & Martínez, R. (2020). *Requerimientos agroecológicos de cultivos 2da Edición* (3). <https://www.researchgate.net/publication/343047223>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMANART). (2015). *Atlas Digital Geográfico*.

- Simkin, A. J., Faralli, M., Ramamoorthy, S., & Lawson, T. (2020). Photosynthesis in non-foliar tissues: implications for yield. *The Plant Journal*, 101(4), 1001–1015. <https://doi.org/10.1111/tpj.14633>
- Sun, H., Xiao, K., Zeng, Z., Yang, B., Duan, H., Zhao, H., & Zhang, Y. (2022). Electroactive biofilm-based sensor for volatile fatty acids monitoring: A review. In *Chemical Engineering Journal* (449). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137833>
- Suzuki, T., Sakamoto, M., Kubo, H., Miyabe, Y., & Hiroshima, D. (2023). Effects of Solar Radiation on Leaf Development and Yield of Tuberous Roots in Multilayered Sweet Potato Cultivation. *Plants*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/plants12020287>
- Tlahig, S., Neji, M., Atoui, A., Seddik, M., Dbara, M., Yahia, H., Nagaz, K., Najari, S., Khorchani, T., & Loumerem, M. (2024). Genetic and seasonal variation in forage quality of lucerne (*Medicago sativa* L.) for resilience to climate change in arid environments. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.100986>
- Trail, S., & Ward, F. (2024). Economically optimized forage utilization choices in drylands for adapting to economic, ecological, and climate stress. *Heliyon*, 10(15). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35254>
- Van der Spiegel, M., Van der Fels, H., & Marvin, H. (2012). Effects of climate change on food safety hazards in the dairy production chain. *Food Research International*, 46(1), 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.12.011>
- Walter, J., Kreyling, J., Singh, B., & Jentsch, A. (2016). Effects of extreme weather events and legume presence on mycorrhization of *Plantago lanceolata* and *Holcus lanatus* in the field. *Plant Biology*, 18(2), 262–270. <https://doi.org/10.1111/plb.12379>
- Wang, M., Bezemer, T. M., van der Putten, W. H., & Biere, A. (2015). Effects of the Timing of Herbivory on Plant Defense Induction and Insect Performance in Ribwort Plantain (*Plantago lanceolata* L.) Depend on Plant Mycorrhizal Status. *Journal of Chemical Ecology*, 41(11), 1006–1017. <https://doi.org/10.1007/s10886-015-0644-0>
- Wilson, S., Donaghy, D., Horne, D., Navarrete, S., Kemp, P., & Rawlingson, C. (2023). *Plantain (Plantago lanceolata L.) Leaf Elongation and Photosynthesis Rates Are Reduced under Waterlogging*. 26. <https://doi.org/10.3390/iecag2023-14976>
- Yang, Y., Guo, X., Liu, H., Liu, G., Liu, W., Ming, B., Xie, R., Wang, K., Hou, P., & Li, S. (2021). The effect of solar radiation change on the maize yield gap from the perspectives of dry matter accumulation and distribution. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(2), 482–493. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63581-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63581-X)
- Zhang, P., Gu, S., Wang, Y., Xu, C., Zhao, Y., Liu, X., Wang, P., & Huang, S. (2023). The relationships between maize (*Zea mays* L.) lodging resistance and yield formation depend on dry matter allocation to ear and stem. *Crop Journal*, 11(1), 258–268. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2022.04.020>
- Zhang, Z., Christensen, M., Nan, Z., Whish, J., Bell, L., Wang, J., Wang, Z., & Sim, R. (2019). Plant development and solar radiation interception of four annual forage plants in response to sowing date in a semi-arid environment. *Industrial Crops and Products*, 131, 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.028>

Zhu, Y., Liu, J., Li, J., Xian, L., Chub, J., Liu, H., Jian, C., Yinghui, S., & Dai, Z. (2023). La siembra tardía aumentó la acumulación de materia seca durante la elongación del tallo en el trigo de invierno al mejorar el rendimiento fotosintético y la acumulación de nitrógeno. *Revista Europea de Agronomía*, 151.