

Evaluación de variables morfogenéticas en pasturas de *Chloris gayana* cv. Épica INTA Pemán bajo sistemas silvopastoril con *Neltuma alba* var. *Griseb* y pastoril

Javier E. Lara¹  Juan C Torres²  Luis Y. Vázquez 

Harold E. B. Vega Parry  Luciana R. Sleiman  Daniel A. Dos Santos 

Facultad de Agronomía, Zootecnia y Veterinaria, Universidad Nacional de Tucumán.
Florentino Ameghino s/n., El Manantial (4104), Tucumán, Argentina.

Evaluation of morphogenetic variables in *Chloris gayana* cv. Épica INTA Pemán pastures under silvopastoral systems with *Neltuma alba* var. *Griseb* and pastoral systems

Abstract. Measurements of morphogenetic variables are fundamental tools for understanding the dynamics and structure of forages, as well as for estimating their productivity. The objective of this study was to evaluate the morphogenetic and ecophysiological response of *Chloris gayana* cv. Épica INTA-Pemán in a silvopastoral and pastoral system, through the analysis of morphogenetic variables (leaf elongation rate, leaf emergence rate, and leaf half-life) and radiation use efficiency (leaf area index, intercepted photosynthetically active radiation, and radiation use efficiency), in order to analyze the effect of tree presence on growth dynamics. The trial was conducted at the Animal Research Institute of the Semi-Arid Chaco (INTA, Tucumán, Argentina). The results obtained for each morphogenetic variable, calculated as single values per clump, were analyzed using ANOVA, followed by the DGC mean comparison test ($p \leq 0.05$), using the R statistical package. Data were recorded for individual clumps, and morphogenetic variables were calculated based on accumulated thermal time ($^{\circ}\text{Cd}$). The results showed significant differences only in TEF ($p < 0.0001$), which was 54 % higher in SSP than in SP, while TAF, phyllochron, VMF, and the number of green leaves per clump did not vary. The leaf area index (LAI) and intercepted photosynthetically active radiation (iPAR) also did not differ significantly, although radiation use efficiency (RUE) was 1.88 times higher in the SP. These results indicate that the environment under tree cover promotes compensatory leaf elongation in response to lower light levels, without affecting the frequency of occurrence or longevity of the leaves, but reduces the conversion of light energy into biomass.

Keywords: Poaceae, Radiation, Leaf elongation rate, Shade, Degree days.

Resumen. Las mediciones de variables morfogenéticas son herramientas fundamentales para comprender la dinámica y estructura de los forrajes, así como para estimar su productividad. El estudio tuvo como objetivo evaluar la respuesta morfogenética y ecofisiológica de *Chloris gayana* cv. Épica INTA-Pemán en un sistema silvopastoril y uno pastoril, mediante el análisis de variables morfogenéticas (tasa de elongación foliar, tasa de aparición foliar y vida media foliar) y de eficiencia en el uso de la radiación (índice de área foliar, radiación fotosintéticamente activa interceptada y eficiencia en el uso de la radiación), a fin de analizar el efecto de la presencia arbórea sobre la dinámica de crecimiento. El ensayo se realizó en el Instituto de Investigación Animal del Chaco Semiárido (INTA, Tucumán, Argentina), Los resultados obtenidos para cada variable morfogenética, al estar calculados como valores únicos por macollo, fueron analizados mediante ANOVA, seguido por la prueba de comparación de medias DGC ($p \leq 0,05$), utilizando el paquete estadístico R. Se registraron datos de macollos individuales y se calcularon las variables morfogenéticas en función del tiempo térmico acumulado ($^{\circ}\text{Cd}$). Los resultados mostraron diferencias significativas únicamente en la TEF ($p < 0,0001$), siendo el SSP 54 % superior al SP, mientras que la TAF, el filocrono, la VMF y el número de hojas verdes por macollo no presentaron variaciones. El índice de área foliar (IAF) y la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) tampoco difirieron significativamente, aunque la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) fue 1,88 veces superior en el SP. Estos

Recibido: 2025-11-09. Revisado: 2026-01-05. Aceptado: 2026-01-20

¹Instituto de Investigación del Chaco Semiárido, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Leales (4113), Tucumán. Argentina.

²Autor para la correspondencia: juan.torres@faz.unt.edu.ar

³Instituto de Biodiversidad Neotropical, CONICET - Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, UNT, Tucumán, Argentina



resultados indican que el ambiente bajo cobertura arbórea promovió una elongación foliar compensatoria en respuesta a la menor luminosidad, sin afectar la frecuencia de aparición ni la longevidad de las hojas, pero reduciendo la conversión de energía lumínica en biomasa.

Palabras claves: Poáceas, Radiación, Tasa de elongación foliar, Sombra, Grados días.

Avaliação de variáveis morfogênicas em pastagens de *Chloris gayana* cv. Épica INTA Pemán sob sistemas silvopastoris com *Neltuma alba* var. *Griseb* e sistemas pastoris.

Resumo. As medições das variáveis morfogênicas são ferramentas fundamentais para compreender a dinâmica e a estrutura das forragens, bem como para estimar a sua produtividade. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a resposta morfogênica e ecofisiológica de *Chloris gayana* cv. Épica INTA-Pemán num sistema silvipastoril e num sistema pastoril, através da análise de variáveis morfogênicas (taxa de alongamento foliar, taxa de aparecimento foliar e vida média foliar) e de eficiência no uso da radiação (índice de área foliar, radiação fotossinteticamente ativa interceptada e eficiência no uso da radiação), a fim de analisar o efeito da presença arbórea sobre a dinâmica de crescimento. O ensaio foi realizado no Instituto de Investigação Animal do Chaco Semiárido (INTA, Tucumán, Argentina). Os resultados obtidos para cada variável morfogênica, calculados como valores únicos por rebento, foram analisados por meio de ANOVA, seguido pelo teste de comparação de médias DGC ($p \leq 0,05$), utilizando o pacote estatístico R. Foram registados dados de macollos individuais e calculadas as variáveis morfogênicas em função do tempo térmico acumulado ($^{\circ}\text{Cd}$). Os resultados mostraram diferenças significativas apenas na TEF ($p < 0,0001$), sendo 54 % superior no SSP em relação ao SP, enquanto que a TAF, o filocrono, a VMF e o número de folhas verdes por macollo não apresentaram variações. O índice de área foliar (IAF) e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFAi) também não diferiram significativamente, embora a eficiência no uso da radiação (EUR) tenha sido 1,88 vezes superior no SP. Estes resultados indicam que o ambiente sob cobertura arbórea promoveu um alongamento foliar compensatório em resposta à menor luminosidade, sem afetar a frequência de aparecimento nem a longevidade das folhas, mas reduzindo a conversão de energia luminosa em biomassa.

Palavras chave: Poáceas, Radiação, taxa de alongamento foliar, Sombra, Graus-dia.

Introducción

En el norte argentino, la producción extensiva de bovinos se sustenta en pasturas subtropicales cultivadas, predominando gramíneas C4 como *Megathyrsus maximus*, *Chloris gayana* y *Pennisetum ciliare*, entre otras (Torres *et al.*, 2024).

Los forrajes, como fuente primaria de nutrientes para el ganado, presentan una composición altamente variable, influenciada por numerosos factores. Características estructurales como la densidad y altura de las plantas, la relación lámina-tallo y la proporción de material vivo respecto al muerto (Rosales & Pinzón, 2005), permiten caracterizar la calidad de la pastura y analizar su variabilidad.

Según Colabelli *et al.* (1998), las mediciones de variables morfogénicas son herramientas fundamentales para comprender la dinámica y estructura de los forrajes, así como para estimar su productividad. Esta información resulta clave para la programación y el manejo eficiente de los sistemas de

producción animal, en especial en lo referido a la selección de especies y estrategias de defoliación.

La morfogénesis se refiere a la dinámica de generación y expansión del tejido vegetal en el espacio relacionado con procesos fisiológicos y ambientales. En una pastura en estado vegetativo, esta dinámica depende de tres variables morfogénicas a nivel del macollo (unidad funcional de las gramíneas): tasa de aparición foliar (TAF), tasa de elongación foliar (TEF) y vida media foliar (VMF). Estas variables, si bien están genéticamente determinadas, también se ven influenciadas por factores ambientales como la temperatura, la luz, la disponibilidad de agua y nutrientes, especialmente el nitrógeno (Chapman y Lemaire, 1993).

La TAF está determinada principalmente por la temperatura (Robson, 1972) y el manejo de la defoliación, mientras que su respuesta a la radiación, el agua y el nitrógeno es limitada. Durante el crecimiento o rebrote post-pastoreo, la TAF tiende a disminuir debido al

alargamiento progresivo de la vaina foliar, lo que retrasa la emergencia de nuevas láminas. Así, pasturas con bajo índice de área foliar (IAF) presentan mayores tasas de aparición foliar que aquellas con IAF elevado (Lemaire y Chapman, 1996).

Por su parte, la TEF es la variable más sensible a cambios ambientales, particularmente a la temperatura (Stoddart *et al.*, 1986), disponibilidad de nitrógeno (Cruz y Boval, 2000; Gastal y Nelson, 1994), agua y radiación. Esta tasa refleja la actividad de división y elongación celular en las zonas de crecimiento foliar.

La VMF, en cambio, depende principalmente de la temperatura acumulada y define la cantidad máxima de hojas verdes por macollo. A temperaturas elevadas, las hojas envejecen más rápidamente, reduciendo su vida fotosintéticamente activa (Wolledge y Jewiss, 1969), mientras que a temperaturas bajas su longevidad se incrementa (Robson, 1972). Este parámetro puede ser utilizado como indicador para determinar la frecuencia óptima de pastoreo, especialmente en sistemas que requieren consumo exclusivo de material verde (Ruolo *et al.*, 2019).

El tiempo térmico se define como la acumulación diaria de calor expresada en unidades térmicas (°Cd, grados/día), y se calcula como la diferencia entre la temperatura media diaria y la temperatura base de crecimiento de la especie. La temperatura base de una gramínea es la temperatura mínima a partir de la cual se produce crecimiento vegetal medible (Agnusdei *et al.* 2009, Jones, 1985, Rawson & Gómez Macpherson, 2001).

En los sistemas silvopastoriles, la presencia del componente arbóreo modifica las interacciones entre el suelo, las plantas y el ambiente, lo que puede mejorar la eficiencia en el uso de recursos naturales. Diversos estudios reportan incrementos en la productividad y calidad de las pasturas debido a la inclusión de árboles

(Peri *et al.*, 2007; Belesky *et al.*, 2006; Kaur *et al.*, 2002; Menezes *et al.*, 2002). Estas mejoras se atribuyen tanto a cambios en las propiedades del suelo (Pollock *et al.*, 2009; Sierra *et al.*, 2002) como a modificaciones en el microclima generado bajo la copa arbórea (Baliscei *et al.*, 2013; Wilson & Ludlow, 1991), los cuales influyen en la dinámica hídrica y el ciclado de nutrientes.

En el norte argentino, amplias áreas ganaderas presentan suelos con distintos grados de salinidad y sodicidad, lo que limita el crecimiento vegetal y la productividad. En este contexto, los sistemas silvopastoriles constituyen una alternativa para mejorar la sustentabilidad de estos ambientes mediante la combinación de especies adaptadas. *Chloris gayana* cv. Épica es una gramínea megatérmica tolerante a suelos salinos, gracias a la presencia de glándulas secretoras de sodio (Taleisnik *et al.*, 1997), mientras que *Neltuma alba* var. *griseb* (ex *Prosopis alba*) es una especie arbórea nativa capaz de fijar nitrógeno atmosférico y tolerar elevados niveles de conductividad eléctrica y pH (Ewens *et al.*, 2012). La asociación de ambas especies podría contribuir a la mejora funcional del suelo y a la mitigación de procesos de salinización secundaria; sin embargo, la presencia del componente arbóreo modifica el ambiente lumínico, lo que justifica evaluar la respuesta morfogénica y ecofisiológica de *Chloris gayana* en sistemas silvopastoriles en la región.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la respuesta morfogénica y ecofisiológica de *Chloris gayana* cv. Épica INTA-Pemán en un sistema silvopastoril y uno pastoril, mediante el análisis de variables morfogénicas (tasa de elongación foliar, tasa de aparición foliar y vida media foliar) y de eficiencia en el uso de la radiación (índice de área foliar, radiación fotosintéticamente activa interceptada y eficiencia en el uso de la radiación), a fin de analizar el efecto de la presencia arbórea sobre la dinámica de crecimiento.

Materiales y Métodos

El estudio se realizó en el Instituto de Investigación Animal del Chaco Semiárido (IIACS) perteneciente al Centro de Investigación Agropecuario (CIAP) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), ubicado en el departamento Leales, Tucumán, Argentina (27°11'10.60''S y 65°14'32.45''O), a una altitud de 335 msnm. El clima es de tipo subtropical subhúmedo con estación seca. La precipitación media anual es de 880 mm concentrados de octubre a marzo. La temperatura media anual es de 19 °C, siendo la media del mes más cálido 25 °C (enero) y la del mes más frío 13 °C (julio). El suelo es un

Haplustol fluvacuéntico (Soil Taxonomy, USDA). El componente pastoril de ambos sistemas es *Chloris gayana* cv. Épica_INTA-Pemán (Gramma Rhodes cv. Épica), el componente arbóreo es una plantación de *Neltuma alba* var. *Griseb* (Ex *Prosopis alba*, algarrobo blanco) implantados en el año 1998 en un marco de plantación de 10 x 10 m dispuesta en hileras con orientación norte-sur. En el año 2020 se realizó un raleo eliminando una de cada tres hileras, lo que dio lugar a un marco de plantación actual de 10 x 10 x 20 m.





Figura 1. Vista general del sistema silvopastoril (*Chloris gayana* + *Neltuma alba*), mostrando la cobertura arbórea y el estrato herbáceo durante el período de crecimiento activo. Fuente: Foto del autor.

El diseño fue completamente al azar con medidas repetidas en el tiempo, con estructura factorial y jerárquica. Se evaluaron dos sistemas de manejo el sistema silvopastoril (SSP) y el sistema pastoril (SP). En el sistema silvopastoril se consideraron dos posiciones contrastantes: bajo copa y ex línea (a 10 metros de la línea de los árboles), por lo que este factor estuvo anidado dentro del sistema silvopastoril, dentro de cada sistema se realizó una clausura de 20 x 20 m. El periodo de evaluación fue desde diciembre del 2023 a enero de 2024, el 27/11/2023 se realizó el corte de homogeneización (CH) dejando un remanente foliar fotosintéticamente activo (entre 1 y 2 hojas verdes).

Se contabilizó el tiempo térmico (diferencia entre la temperatura media diaria y la temperatura base de crecimiento) en base a los grados días de crecimiento ($^{\circ}\text{Cd}$) acumulados durante el periodo experimental. En el SSP se individualizaron aleatoriamente 40 macollos, 20 bajo copa y 20 en ex línea, (5 macollos por mata) y 20 macollos (5 macollos por mata) en el SP, siendo la unidad experimental el macollo (unidad funcional-estructural de las gramíneas), los macollos seleccionados se marcaron con alambres de colores para su identificación y posterior seguimiento, las mediciones de los parámetros morfogenéticos comenzaron a los 10 días luego del CH, con una frecuencia de 2 veces por semana.

Se registraron los datos ambientales de temperatura y precipitación a través de una Estación Meteorológica Automática (Davies Modelo Vantage Pro 2).

Medición de parámetros:

Longitud de lámina verde: las longitudes parciales de cada una de las láminas (tejido verde) se midieron

con regla metálica (1 mm de precisión). Se registraron todas las láminas verdes presentes en el macollo, desde la lígula hasta su extremo distal. Las hojas presentaron dos situaciones, hojas con lígula visible y hojas sin lígula visible (se midieron desde la última hoja con lígula visible hasta su extremo distal). También se registraron el estado de la hoja, (cortada, comida, enferma y senescente o muerta) indicando con un código su situación.

Para el recuento del número de hojas verdes (NHV) por macollo, se contabilizó cada hoja verde, asignando un valor de 1 a las hojas con lígula visible y de 0,5 a las hojas verdes sin lígula visible. Asimismo, las hojas que presentaron 20 mm o más de material senescente, medidos desde el ápice hacia la base, no fueron consideradas en el recuento de hojas verdes por macollo.

Macollos nuevos: se registró cuando apareció un macollo hijo o un macollo nieta, se lo mencionó en las observaciones, aclarando el número de orden de la hoja que dio lugar a ese macollo.

Pseudotallo: se midió la distancia desde el suelo hasta la última hoja desplegada con lígula visible.



Figura 2. Detalle del macollo basal de *Chloris gayana* marcado individualmente con un alambre de color. Fuente: Foto del autor.

Cálculos de las variables

Tiempo térmico acumulado: es la sumatoria de los grados días de crecimiento (GDC) acumulado de cada día a lo largo del ciclo de crecimiento del experimento. Para ello, se calculó la diferencia diaria de GDC entre la temperatura media diaria (T , $^{\circ}\text{C}$) y la temperatura base (T_b , $^{\circ}\text{Cd}$) de crecimiento que es de 12°C para *Chloris gayana* (Agnusdei et al. 2009, Jones, 1985).

Tasa de elongación foliar (TEF, $\text{mm}/^{\circ}\text{Cd}$) por macollo: se calculó como la pendiente de la recta entre la sumatoria de las longitudes finales de cada lámina

verde (mm) de un macollo y la acumulación de tiempo térmico ($^{\circ}\text{Cd}$) durante el periodo de evaluación. Para la sumatoria de láminas verdes, se consideró desde la primera fecha de medición hasta la última, en la cual la 5^a lámina verde presentó su lígula visible correspondiente a su máxima elongación foliar.

Filocrono y tasa de aparición foliar (TAF): durante la fase de un crecimiento lineal, se calculó primero el tiempo térmico transcurrido para la aparición de las hojas 4^{ta} y 7^{ma}, se restaron y luego se dividieron en 3 (cantidad de hojas) y se obtuvo el filocrono promedio y para TAF se aplicó la inversa proporcional del filocrono. Para calcular la aparición de cada hoja, se asume la fase lineal de crecimiento y se aplica la función de una recta lineal, se tomaron en cuenta dos mediciones o más de longitudes de hoja en expansión en dos tiempos térmicos acumulados.

Vida media foliar (VMF): para esta variable se tuvo en cuenta el filocrono calculado en la fórmula anterior y multiplicándolo por el número de hojas verdes por macollo.

Biomasa aérea (BA): se cosecharon muestras de 0,25 de m^2 por sistema de producción (4 repeticiones) y se colocaron en una bolsa plástica debidamente etiquetada por muestra y se refrigeraron. En laboratorio, se registró el peso fresco total de cada muestra con la ayuda de una balanza analítica de 0,01 g de precisión. Luego se tomó una submuestra de aproximadamente 100 g de peso, se separaron los componentes del rendimiento y se los colocó en estufa de circulación forzada de aire a 60°C hasta peso seco constante. Se determinó la materia seca total (Materia Seca, MS %) y de cada componente de la muestra (Biomasa aérea, BA kg/ha; Biomasa lámina, BL kg/ha; Biomasa tallo, BT kg/ha; Material Senescente, MSencs kg/ha). Las evaluaciones se realizaron al finalizar las mediciones a los 700°dc (18/01/2024).

Índice de Área Foliar (IAF, m^2 de hoja/ m^2): para determinar IAF, primero se determinó el área foliar específica (AFE, m^2 lam/g lam), a partir de las láminas verdes de cada macollo por repetición de cada tratamiento de las muestras cosechadas para la determinación de la biomasa aérea. Las láminas se pasaron por un scanner para determinar el área foliar (m^2 de lam) por macollo. Las imágenes se analizaron

con el software Image J. Luego de la determinación del área foliar, las láminas se secaron en estufa a 60°C hasta peso seco constante. Se calculó el AFE como el cociente entre la superficie foliar medida y el peso seco de la misma. Luego se calculó el IAF (m^2 lam/ m^2 suelo) como el producto entre el AFE y la biomasa de lámina por unidad de superficie (gr/m^2).

Radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi, MJ/día): para cada sistema SSP y SP, se realizaron lecturas de radiación fotosintéticamente activa (RFA) incidente por medio de un ceptómetro (Accu-Par LP-80, Decagon Devices Inc., Pullman, Washington, USA) las mismas se realizaron los días de evaluación de los macollos marcados. A tal fin se realizó una lectura superior (por encima de la canopia) y tres lecturas inferiores (a nivel del suelo y por encima del material senescente) en cada sistema. Los valores obtenidos se utilizaron para determinar el porcentaje de RFA interceptada a partir de la siguiente ecuación:

$$\% \text{RFAi} = (1 - \text{RFA inferior} / \text{RFA superior}) * 100 \text{ Ec. 1}$$

$\% \text{RFAi}$: porcentaje de radiación fotosintéticamente activa interceptada

RFAinferior: promedio de 3 mediciones de radiación fotosintéticamente activa interceptada a nivel del suelo y por arriba del material senescente

RFAsuperior: radiación fotosintéticamente activa interceptada por arriba de la canopia.

Posteriormente se estimó el porcentaje RFAi diario a partir de la interpolación lineal entre dos mediciones sucesivas. Este valor se multiplicó por la RFA incidente (MJ/m^2) de cada día y a partir de la sumatoria de estos valores se obtuvo la RFA interceptada total en cada tratamiento.

La eficiencia de uso de la radiación (EUR) fue calculada como la pendiente de la regresión lineal entre la BA y RFAi acumulada a los 700°Cd .

Los resultados obtenidos para cada variable morfogénica, al estar calculados como valores únicos por macollo, fueron analizados mediante ANOVA, seguido por la prueba de comparación de medias DGC ($p \leq 0,05$), utilizando el paquete estadístico R.



Resultados

Clima en el periodo del ensayo

En la figura 3 se puede observar los valores diarios durante el periodo experimental. Para la variable temperatura ambiental (T, °C, Figura 3 A), el promedio fue de 24,9 °C, sin diferencias significativas para el mismo periodo histórico (24,2 °C).

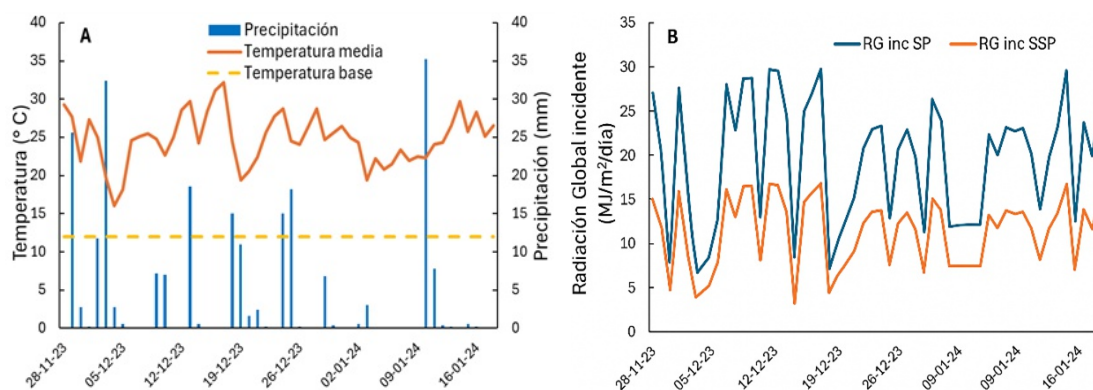


Figura 3; Variables agrometeorológicas durante el experimento (52 días de duración), Temperatura promedio diaria, temperatura base (°C, recuadro A) y precipitación (mm, recuadro A); radiación global incidente (MJ/m²/día, recuadro B) disponible para el sistema silvopastoril y pastoril. Resultado de las variables morfológicas

En el Cuadro 1, se presentan los valores medios para las variables morfológicas. La única variable que presentó diferencias significativas ($p < 0,0001$) fue la TEF (mm/°Cd), a favor del SP superior en 54 %. Para las demás variables registradas no hubo diferencias

entre los sistemas evaluados, dando un valor promedio para TAF = 0,0147 hojas/°Cd ($p = 0,776$), FILO = 75,8 °Cd /hoja ($p = 0,9749$), VMF = 279,3 °Cd ($p = 0,388$) y N° Hojas 3,76 hojas/mac ($p = 0,3069$).

Cuadro 1. Análisis de la varianza de las variables morfológicas; Tasa de elongación foliar (TEF, mm/°Cd), Tasa de aparición foliar (TAF, hojas/°Cd), Filocrono (FILO, °Cd/hoja), Vida media foliar (VMF, °Cd) y Numero de hojas vivas (hojas/mac), de *Chloris gayana* cv. Épica INTA-Pemán, para un periodo de crecimiento (52 días) en un Sistema silvopastoril (SSP) y Sistema pastoril (SP).

Sistema	TEF (mm/°Cd)	TAF (hojas/°Cd)	FILO (°Cd/hoja)	VMF (°Cd)	Número de Hojas (hojas/mac)
SSP	6,08 ± 0,39 ^b	0,0145 ± 0,0012 ^a	75,9013 ± 5,49 ^a	289,53 ± 19,23 ^a	3,88 ± 0,19 ^a
SP	3,95 ± 0,27 ^a	0,0149 ± 0,0009 ^a	75,6893 ± 3,88 ^a	269,05 ± 13,59 ^a	3,64 ± 0,13 ^a

mm, milímetros de hoja; °Cd, grados días de crecimiento; mac, macollo; letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas Test DGC ($p < 0,05$)

El gráfico radar (Figura 4) permite visualizar de forma simultánea las tres principales variables morfológicas evaluadas: la tasa de elongación foliar (TEF), la tasa de aparición foliar (TAF) y la vida media foliar (VMF). Esta representación gráfica muestra que el sistema silvopastoril (SSP) presentó una mayor TEF en comparación con el sistema pastoril (SP), lo cual refleja un alargamiento de las hojas posiblemente en respuesta a la menor disponibilidad de luz.

Sin embargo, tanto la TAF como la VMF no mostraron diferencias sustanciales entre sistemas, lo que indica que estas variables estarían más determinadas por factores

térmicos que por condiciones lumínicas. Esto sugiere que, si bien hubo una respuesta morfológica adaptativa en el SSP (mayor elongación), esta no se acompañó de cambios relevantes en la frecuencia de aparición o en la vida media foliar.

Las variables que definen la producción de la pastura presentaron diferencias en todas las variables medidas, más de dos veces lo producido en SSP, siempre a favor del sistema SP, siendo 2,3 ($p = 0,0255$), 2,4 ($p = 0,0086$), 2,1 ($p = 0,0679$), 3,0 ($p = 0,0337$) y 1,3 ($p = 0,0172$) veces más para BA, BL, BT, Msensc y MS, respectivamente.

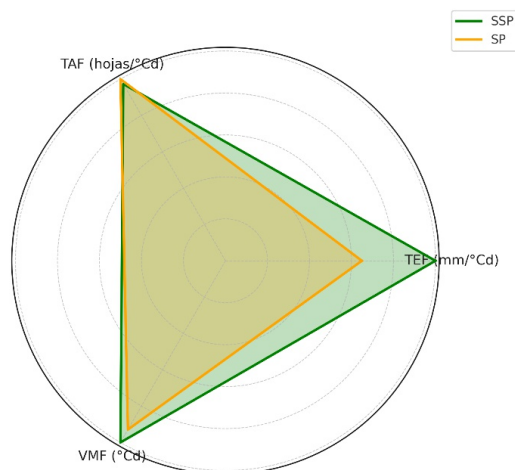


Figura 4. Gráfico radar comparativo de las variables morfológicas tasa de elongación foliar (TEF), tasa de aparición foliar (TAF) y vida media foliar (VMF) de *Chloris gayana* cv. Épica INTA-Pemán en un sistema silvopastoril (SSP) y en un sistema pastoril (SP).

Cuadro 2. Análisis de la varianza de las variables productivas; Biomasa aérea (BA, kg/ha), Biomasa lámina (BL, kg/ha), Biomasa tallo (BT, kg/ha), Material Senescente (MSensc, kg/ha), Materia Seca (MS, %), de *Chloris gayana* cv. Épica INTA-Pemán, para un periodo de crecimiento (52 días) en un Sistema silvopastoril (SSP) y Sistema pastoril a cielo abierto (SP).

Sistema	BA (kg/ha)	BL(kg/ha)	BT(kg/ha)	MSensc (kg/ha)	MS(%)
SSP	3718,7 ± 1041,0 ^a	1721,4 ± 424,3 ^a	1858,8 ± 581,3 ^a	138,4 ± 65,1 ^a	17,0 ± 1,0 ^a
SP	8446,6 ± 1472,2 ^b	4113,6 ± 600,1 ^b	3919,2 ± 822,1 ^b	415,8 ± 92,1 ^b	22,0 ± 1,4 ^b

letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas Test DGC (p < 0,05)

Cuadro 3. Análisis de la varianza de las variables: Índice de área foliar (IAF), Radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (RFAi acum, MJ/m²), Eficiencia de uso de la radiación (EUR, gMS/MJ), de *Chloris gayana* cv. Épica INTA-Pemán, para un periodo de crecimiento (52 días) en un Sistema silvopastoril (SSP) y Sistema pastoril (SP).

Sistema	IAF	RFAi acum(MJ/m ²)	EUR(gMS/MJ)
SSP	0,91 ± 0,06 ^a	196,4 ± 25,6 ^a	1,79 ± 0,25 ^a
SP	1,05 ± 0,08 ^a	240,5 ± 36,3 ^a	3,37 ± 0,36 ^b

MJ, mega joule, letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas Test DGC (p < 0,05).

La IAF y la RFA interceptada acumulada no presentaron diferencias significativas a nivel sistema, dando un promedio de 0,98 y 218,4 MJ/m² (p = 0,3446) respectivamente. Pero para la EUR si se registraron diferencias significativas a favor de SP en 1,88 veces más que el SSP (p = 0,0049).

Los resultados obtenidos mostraron que el sistema silvopastoril (SSP) promovió una mayor tasa de

elongación foliar (TEF), mientras que el sistema pastoril (SP) presentó una mejor eficiencia en el uso de la radiación (EUR). La tasa de aparición foliar (TAF), el filocrono y la vida media foliar (VMF) no mostraron diferencias significativas entre sistemas, indicando que estas variables estuvieron más influenciadas por la temperatura acumulada que por las condiciones lumínicas.

Discusión

La mayor tasa de elongación foliar (TEF) observada en el sistema silvopastoril (SSP) sugiere que el ambiente bajo cobertura arbórea favorece el alargamiento de las láminas foliares, probablemente como mecanismo de compensación frente a la reducción de la intensidad lumínica. Esta respuesta adaptativa es coherente con lo reportado por Carvalho *et al.* (2022) y Baldissera *et al.* (2014), quienes

observaron que gramíneas tropicales expuestas a condiciones de sombra desarrollan hojas más largas como estrategia para optimizar la captura de luz.

Sin embargo, dicho ajuste morfológico no se tradujo en una mayor eficiencia productiva. El sistema pastoril (SP) superó significativamente al SSP en términos de biomasa aérea, porcentaje de materia seca y eficiencia

en el uso de la radiación (EUR). Esto indica que, si bien las plantas bajo sombra elongaron más sus hojas, su capacidad fotosintética y la conversión de radiación en biomasa fueron limitadas. Una posible explicación es la alteración en la calidad de la luz, en particular, una disminución en la relación rojo:rojo-lejano bajo el dosel arbóreo, como también lo sugieren Lopes *et al.* (2017) y Beaudet *et al.* (2011).

La ausencia de diferencias significativas en la tasa de aparición foliar (TAF), el filocrono, la vida media foliar (VMF) y el número de hojas verdes por macollo refuerza la idea de que estas variables están más influenciadas por la temperatura acumulada que por la luminosidad, patrón también observado por Ruolo *et al.* (2019) en *Chloris gayana* sometida a distintos manejos de defoliación. Esto apoya la noción de que ciertas variables fisiológicas se mantienen estables ante cambios moderados del ambiente, mientras otras como la elongación foliar presentan una mayor plasticidad adaptativa.

Respecto a la eficiencia en el uso de la radiación, los datos obtenidos muestran que el sistema SP duplicó los valores registrados en SSP. A pesar de que el índice de área foliar (IAF) y la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) no difirieron significativamente entre tratamientos, estos resultados sugieren que la principal limitación en SSP no fue estructural sino fisiológica: aunque se interceptó una cantidad de radiación similar, la conversión de esta energía en biomasa fue considerablemente menor. Esta interpretación concuerda con lo propuesto por Lemaire *et al.* (1997), y se alinea con principios ecológicos que

explican las restricciones en eficiencia lumínica bajo condiciones de sombra.

Este comportamiento subraya que el principal factor limitante en SSP fue el uso efectivo de la radiación más que su disponibilidad. La menor EUR podría atribuirse, nuevamente, a la alteración de la calidad espectral de la luz bajo el dosel, lo cual compromete los procesos fotosintéticos y la eficiencia fisiológica global del cultivo. Tal fenómeno ha sido ampliamente documentado por Beaudet *et al.* (2011) y Carvalho *et al.* (2022), quienes informaron disminuciones similares en ambientes con cobertura arbórea densa.

Además, los resultados obtenidos en este estudio se alinean con lo reportado por Coêlho *et al.* (2025), quienes evaluaron la respuesta estructural y productiva de *Urochloa decumbens* en sistemas silvopastoriles. En su investigación, encontraron una marcada reducción en la biomasa aérea y en la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) en presencia de árboles, particularmente *Mimosa caesalpiniiifolia*. A pesar de registrar valores similares de interceptación de radiación fotosintéticamente activa (RFAi), los autores concluyen que la principal limitación es de tipo fisiológica, atribuida a la competencia por recursos edáficos y a la alteración en la calidad de la luz, especialmente por la disminución en la relación rojo:rojo-lejano. Este patrón coincide con lo observado en el presente estudio, donde, si bien no se detectaron diferencias estructurales marcadas entre tratamientos, la eficiencia fotosintética y la producción de biomasa fueron inferiores en el sistema silvopastoril.

Conclusión

El sistema silvopastoril modificó la dinámica morfogénica de *Chloris gayana* cv. Épica principalmente a través de un aumento significativo en la tasa de elongación foliar, evidenciando una respuesta morfológica adaptativa frente a la reducción de la disponibilidad lumínica bajo cobertura arbórea. Sin embargo, este ajuste estructural no fue suficiente para sostener una eficiencia en el uso de la radiación comparable a la observada en el sistema pastoril.

La ausencia de diferencias en la tasa de aparición foliar, el filocrono, la vida media foliar y el número de hojas verdes por macollo indica que estas variables estuvieron mayormente reguladas por el tiempo térmico acumulado, manteniéndose estables ante

condiciones moderadas de sombra. En contraste, la menor eficiencia en la conversión de la radiación interceptada en biomasa en el sistema silvopastoril sugiere una limitación de carácter fisiológico más que estructural.

En conjunto, los resultados muestran que la presencia del componente arbóreo promovió una compensación morfológica parcial, caracterizada por hojas más elongadas, pero con un impacto negativo sobre la eficiencia energética del sistema, lo que pone de manifiesto la necesidad de considerar no solo la interceptación de radiación sino también su calidad y su uso efectivo al evaluar el desempeño productivo de pasturas megatérmicas en sistemas silvopastoriles.

Conflicto de interés: Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Contribución de los autores: Los autores participaron en la toma de datos, análisis y escritura del trabajo y están de acuerdo con el escrito



Financiación: Los fondos fueron percibidos del programa PIUNT (A732): "Eficiencia y Sostenibilidad en sistemas ganaderos: efectos de la alimentación y el bienestar animal sobre el producto y el medio ambiente". Dirección, Ing. Zoot. Dr. Vega Parry, Harold Enrique Bernabé, Proyecto Estructural, Cartera 2023-INTA (2023-PE-L03-I068), "Integración de Sistemas Forestales y Ganaderos: Sistemas Silvopastoriles Implantados y Manejo de Bosques con Ganadería Integrada (MBGI)". Dirección Ing. Ftal. (MSc) Hernán Héctor Hernández y Proyecto Disciplinario, Cartera 2023-INTA (2023-PD-L01-I098), "Producción Ecoeficiente de Forraje en Pasturas y Pastizales". Dirección Dr. Ing. Agr. German Darío Berone.

Editado por: Omar Araujo-Febres.

Literatura Citada

- Agnusdei, M. G., Nanning, F. R., Di Marco, O. N. y Aello, M. S. 2009. Variaciones de calidad nutritiva durante el crecimiento vegetativo de gramíneas megatérmicas de diferente porte y longitud foliar (*Chloris gayana* y *Digitariadecumbens*). Rev. Arg. Prod. Anim., 29 (1): 1325.
- Baldissera, TC, Pontes, LS, Barro, RS, Giostri, AF, Guera, KCS, Michetti, M, da Silva, VP, Carvalho, PCF. 2014. Phyllochron and leaf lifespan of four C4 forage grasses cultivated in association with trees. Tropical Grasslands - Forrajes Tropicales, 2(1):12-14. [https://doi.org/10.17138/TGFT\(2\)12-14](https://doi.org/10.17138/TGFT(2)12-14)
- Baliscei, MA, Barbosa, A, de Souza, D, Teixeira, MA, Costa, A, Krutzmann, A, de Oliveira Queiroz, E. 2013. Microclimate without shade and silvopastoral system during summer and winter. Acta Scientiarum. Animal Sciences, 35(1):49-56.
- Beaudet, M, Messier, C, Leduc, A. 2011. Understory light profiles in temperate mixed forests: Simulations and comparisons with empirical data. Ecological Modelling, 222(14):2484-2492. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.05.010>
- Belesky, DP, Chatterton, NJ, Neel, JPS. 2006. *Dactylis glomerata* growing along a light gradient in the central Appalachian region of the eastern USA: III. Nonstructural carbohydrates and nutritive value. Agroforestry Systems, 67:51-61.
- Carvalho, MM, Xavier, DF, Alvim, MJ. 2000. Uso de leguminosas arbóreas en la recuperación y sustentabilidad de pasturas cultivadas. EMBRAPA, Ganado de Leche.
- Carvalho, PCF, Paim, TP, Dall'Agnol, M, Dalmago, GA, Nabinger, C. 2022. Morphogenetic and structural characteristics of Tanganyika grass subjected to different shading intensities. Revista Brasileira de Zootecnia, 51:e20210103. <https://doi.org/10.37496/rbz5120210103>
- Chapman, DF, Lemaire, G. 1993. Morphogenetic and structural determinants of plant regrowth after defoliation. Grass and Forage Science, 48(3):301-313. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1993.tb01867.x>
- Coelho, EM, da Silva, DJ, Duarte, MO, Mello, SBS, dos Santos, JC. 2025. Structural and productive responses of signalgrass and its association with leaf area index and light interception in silvopastoral systems. Agrosystems, Geosciences & Environment, 8(2):e2024-0075. <https://doi.org/10.1002/agg2.2024-0075>
- Colabelli, M, Agnusdei, M, Mazzanti, A, Labreuveux, M. 1998. Boletín Técnico N° 148. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación, INTA, EEA Balcarce.
- Cruz, P, Boval, M. 2000. Effect of nitrogen on some morphological traits of temperate and tropical perennial forage grasses. En Lemaire, G, Hodgson, J, Moraes, H, Nabinger, C, Carvalho, PCF (eds.). Grassland Ecophysiology and Grazing Ecology of Natural Grasslands. CAB International, Wallingford (UK), pp. 151-168.
- Ewens N.; Gezan, S. & Felker, P. 2012. Five Year Field Evaluation of *Prosopis alba* Clones on pH 9-10 Soils in Argentina Selected for Growth in the Greenhouse at Seawater Salinities (45 dS m⁻¹). Forests, 3: 95-113.
- Gastal, F, Nelson, CJ. 1994. Nitrogen use within the growing leaf blade of tall fescue. Plant Physiology, 105(1):191-197.
- Jones, C.A. 1985. C4 grasses and cereals: growth, development and stress response. Wiley & Sons. eds., New York, US.
- Kaur, B, Gupta, SR, Singh, R. 2002. Carbon storage and nitrogen cycling in silvopastoral systems on a sodic soil in northwestern India. Agroforestry Systems, 54:21-29.
- Lemaire, G, Chapman, D. 1996. Tissue flows in grazed plant communities. En Hodgson, J, Illius, AW (eds.). The Ecology and Management of Grazing Systems. CAB International, Wallingford (UK), pp. 3-36.
- Lemaire, G, Jeuffroy, MH, Gastal, F. 1997. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: Theory and practices for crop N management. European Journal of Agronomy, 7(1-3):261-272. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(97\)00089-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(97)00089-8)



- Lopes, CM, Paciullo, DSC, Araújo, SAC, Morenz, MJF, Gomide, CAM, Maurício, RM, Braz, TGS. 2017. Plant morphology and herbage accumulation of signal grass with or without fertilization, under different light regimes. *Ciência Rural*, 47(2):e20160472. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160472>
- Menezes, RSC, Salcedo, IH, Elliott, ET. 2002. Microclimate and nutrient dynamics in a silvopastoral system of semiarid northeastern Brazil. *Agroforestry Systems*, 56:27-38.
- Peri, PL, Lucas, RJ, Moot, DJ. 2007. Dry matter production, morphology and nutritive value of *Dactylis glomerata* growing under different light regimes. *Agroforestry Systems*, 70:63-79.
- Pollock, KM, Mead, J, McKenzie, BA. 2009. Soil moisture and water use by pastures and silvopastures in a sub-humid temperate climate in New Zealand. *Agroforestry Systems*, 75:223-238.
- Rawson, HM, Gómez Macpherson, H. 2001. Trigo regado: Manejo del cultivo. FAO, Roma.
- Robson, MJ. 1972. The effect of temperature on the growth of S.170 tall fescue (*Festuca arundinacea*). I. Constant temperature. *Journal of Applied Ecology*, 9(2):643-653.
- Rosales, RB, Pinzón, SS. 2005. Limitaciones físicas y químicas de la digestibilidad de pastos tropicales y estrategias para aumentarla. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 6(1):69-82.
- Ruolo, S, Pérez, H, Rodríguez, A. 2019. *Chloris gayana* Kunth under different defoliation regimes: Morphogenesis, sward structure and leaf area index. *Grass and Forage Science*, 74:720-727.
- Sierra, J, Dulorme, M, Desfontaines, L. 2002. Soil nitrogen as affected by *Gliricidia sepium* in a silvopastoral system in Guadeloupe, French Antilles. *Agroforestry Systems*, 54:87-97.
- Stoddart, JL, Thomas, H, Lloyd, EJ, Pollack, CJ. 1986. The use of a temperature-profiled position transducer for the study of low temperature growth in Graminae. *Planta*, 167:359-363.
- Taleisnik, E.; Peyrano, G.; Arias, C. 1997. Response of *Chloris gayana* cultivars to salinity. Germination and early vegetative growth. *Tropical grassland*. 31: 232-240.
- Torres, J. C., Lara, J. E., Viana, H. J. A., Auat, M. E., Vega Parry, H. E. B., Rodríguez, S., ... & Dos Santos, D. A. 2024. Evaluación de los indicadores metabólicos en vaquillonas Braford recriadas durante el invierno en dos sistemas de producción: Pastoril y Silvopastoril. <https://doi.org/10.53588/alpa.320403>
- Wilson, JR, Ludlow, MM. 1991. The environment and potential growth of herbage under plantations. En Shelton, HM, Stür, WW (eds.). *Forages for Plantation Crops: Proceedings of Workshop, Sanur Beach, Bali, Indonesia, 27-29 June 1990*. ACIAR Proceedings No. 32, 168 p.
- Woledge, J, Jewiss, OR. 1969. The effect of temperature during growth on the subsequent rate of photosynthesis in leaves of tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb). *Annals of Botany*, 33(5):897-913.