



Comportamiento de rendimiento de cuatro tipos de Brachiarias, con diferentes niveles de nitrógeno en Entisol

Yield behavior on the four types of Brachiarias, with different levels of nitrogen on Entisol

Comportamento produtivo de quatro tipos de Brachiaria sob diferentes níveis de nitrogênio em Entisol

ARTÍCULO ORIGINAL



Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:

<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i28.463>

Kentaro Tomita ^{1,2,3}
ktomita@espol.edu.ec

Félix Arrúa Macuello ¹
arruafelix@hotmail.com

Neida Milena Bogado ¹
bogadoneida@gmail.com

Juan Alberto Bottino Fernández ¹
jabfer@yahoo.com.ar

¹ Facultad de Ciencias Agropecuarias y Desarrollo Rural, Universidad Nacional de Pilar, Pilar, Paraguay.

² Facultad de Ciencias de la Vida, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.

³ Agencia de Cooperación Internacional del Japón, JICA.

Artículo recibido: 7 de noviembre 2025 / Arbitrado: 20 de diciembre 2025 / Publicado: 7 de enero 2026

RESUMEN

Objetivo: Evaluar la respuesta productiva, la concentración de proteína bruta y el retorno económico de cuatro genotipos de Urochloa bajo cuatro niveles de nitrógeno durante dos ciclos de cultivo en Pilar, Ñeembucú. **Métodos:** Se evaluaron B. decumbens, B. brizantha, B. brizantha MG4 y B. brizantha MG5, con 0, 100, 200 y 300 kg N ha⁻¹, en un diseño de parcelas divididas con tres repeticiones. Se determinó rendimiento de materia seca, proteína bruta, indicadores edáficos iniciales y margen neto por venta hipotética del forraje como ensilaje. **Resultados:** El nitrógeno y la interacción ciclo x genotipo modificaron significativamente el rendimiento de materia seca. En el primer ciclo destacó B. brizantha MG5, especialmente con 200 kg N ha⁻¹, mientras que en el segundo ciclo B. decumbens mostró mayor estabilidad y mejor desempeño relativo. La proteína bruta respondió al ciclo, al genotipo, a la dosis de N y a sus interacciones, con evidencias de efectos de dilución y concentración según el balance entre biomasa y N acumulado. Económicamente, B. decumbens con 300 kg N ha⁻¹ generó el mayor ingreso neto acumulado de los dos ciclos. **Conclusión:** En el Entisol evaluado, la fertilización nitrogenada incrementó el potencial productivo de Urochloa, pero la respuesta fue específica por genotipo y ciclo. Para sistemas de corte orientados a ensilaje en Ñeembucú, B. decumbens aparece como la alternativa más estable bajo alta fertilización, mientras que MG5 requiere manejo ajustado al riesgo térmico e hídrico.

Palabras clave: Brachiaria decumbens; Urochloa brizantha; fertilización nitrogenada; materia seca; proteína bruta; análisis económico; Entisol

ABSTRACT

Objective: To evaluate dry-matter yield, crude protein concentration and economic return of four Urochloa genotypes under four nitrogen rates across two crop cycles in Pilar, Ñeembucú, Paraguay. **Methods:** B. decumbens, B. brizantha, B. brizantha MG4 and B. brizantha MG5 were tested with 0, 100, 200 and 300 kg N ha⁻¹ in a split-plot design with three replications. Dry-matter yield, crude protein, initial soil attributes and net margin from a hypothetical silage-oriented sale were assessed. **Results:** Nitrogen and the cycle x genotype interaction significantly affected dry-matter yield. B. brizantha MG5 performed best during the first cycle, especially at 200 kg N ha⁻¹, whereas B. decumbens showed greater stability and higher relative performance in the second cycle. Crude protein was affected by cycle, genotype, nitrogen rate and their interactions, suggesting dilution and concentration effects according to the balance between biomass production and N accumulation. Economically, B. decumbens fertilized with 300 kg N ha⁻¹ produced the highest cumulative net income over the two cycles. **Conclusion:** Nitrogen fertilization increased the productive potential of Urochloa in the evaluated Entisol, but responses were genotype- and cycle-specific. For silage-oriented cut-and-carry systems in Ñeembucú, B. decumbens is the most stable option under high N supply, whereas MG5 requires management that accounts for thermal and water-related risks.

Keywords: Brachiaria decumbens; Urochloa brizantha; nitrogen fertilization; dry matter; crude protein; economic analysis; Entisol.

RESUMO

Objetivo: Avaliar a resposta produtiva, a concentração de proteína bruta e o retorno econômico de quatro genótipos de Urochloa sob quatro níveis de nitrogênio durante dois ciclos de cultivo em Pilar, Ñeembucú. **Métodos:** Foram avaliadas B. decumbens, B. brizantha, B. brizantha MG4 e B. brizantha MG5, com 0, 100, 200 e 300 kg N ha⁻¹, em um delineamento de parcelas subdivididas com três repetições. Determinaram-se o rendimento de matéria seca, a proteína bruta, os indicadores edáficos iniciais e a margem líquida pela venda hipotética da forragem como silagem. **Resultados:** O nitrogênio e a interação ciclo x genótipo modificaram significativamente o rendimento de matéria seca. No primeiro ciclo, destacou-se B. brizantha MG5, especialmente com 200 kg N ha⁻¹, enquanto no segundo ciclo B. decumbens apresentou maior estabilidade e melhor desempenho relativo. A proteína bruta respondeu ao ciclo, ao genótipo, à dose de N e às suas interações, com evidências de efeitos de diluição e concentração conforme o equilíbrio entre biomassa e N acumulado. Económicamente, B. decumbens com 300 kg N ha⁻¹ gerou a maior receita líquida acumulada dos dois ciclos. **Conclusão:** No Entisol avaliado, a fertilização nitrogenada aumentou o potencial produtivo de Urochloa, mas a resposta foi específica por genótipo e ciclo. Para sistemas de corte destinados à silagem em Ñeembucú, B. decumbens aparece como a alternativa mais estável sob alta fertilização, enquanto MG5 requer manejo ajustado ao risco térmico e hídrico.

Palavras-chave: Brachiaria decumbens; Urochloa brizantha; fertilização nitrogenada; matéria seca; proteína bruta; análise econômica; Entisol.

INTRODUCCIÓN

La intensificación sostenible de la ganadería tropical y subtropical exige incrementar la producción de forraje por unidad de superficie sin acelerar la degradación del suelo ni aumentar de forma ineficiente las pérdidas de nitrógeno. La ganadería basada en pasturas sigue siendo central para la seguridad alimentaria regional, pero su desempeño depende de la calidad del recurso forrajero, de la estabilidad de la oferta estacional y de la reposición de nutrientes exportados o redistribuidos dentro del sistema suelo-planta-animal (1–3). En el Cono Sur, donde coexisten pastizales naturales, pasturas cultivadas y sistemas mixtos, el manejo de gramíneas C4 adaptadas constituye una vía directa para reducir brechas de productividad y mejorar la resiliencia ante variabilidad climática.

Las especies del complejo *Urochloa* spp., históricamente denominadas *Brachiaria* en la literatura agronómica, ocupan una posición estratégica por su tolerancia a acidez, baja fertilidad, periodos de déficit hídrico y presión de pastoreo, además de su capacidad para producir biomasa y contribuir al reciclaje de nutrientes (4,5). Este género posee raíces abundantes y profundas, con potencial para capturar nutrientes en capas no exploradas por cultivos superficiales,

aumentar el aporte de residuos y modificar procesos microbianos asociados al ciclo del N (4,6). No obstante, esa rusticidad no debe interpretarse como independencia de la fertilización. En pasturas tropicales, la ausencia de fertilización de mantenimiento y el sobreuso han sido identificados como causas recurrentes de declinación productiva, pérdida de cobertura y deterioro del balance de N (7–9).

El nitrógeno es el nutriente que con mayor frecuencia limita el crecimiento de gramíneas forrajeras C4. Su aporte estimula el macollamiento, el área foliar, la tasa de acumulación y, en muchos casos, la concentración de proteína bruta. Ensayos en pasto Marandu han mostrado aumentos de masa de forraje, carga animal y ganancia por hectárea con dosis crecientes de N, aunque con reducción progresiva de la eficiencia de uso del N a dosis altas (10). Asimismo, la fertilización nitrogenada modifica las fracciones proteicas y de carbohidratos, aspecto relevante para sincronizar degradación ruminal, aporte energético y utilización de N por rumiantes (11). Por ello, la dosis agronómicamente óptima no siempre coincide con la dosis de mayor biomasa; debe evaluarse considerando calidad nutricional, costo del fertilizante, destino del forraje y riesgo ambiental (12,13).

La respuesta al N depende del

genotipo. En *Urochloa brizantha* cv. Marandu, por ejemplo, se han reportado incrementos productivos marcados hasta límites que varían con el clima, la fertilidad inicial y la estrategia de defoliación (14). Otras evaluaciones indican que la fisiología de gramíneas C4 y la estructura del dosel deben integrarse al calendario de corte o pastoreo, porque la interceptación de luz, la densidad de macollos y el equilibrio hoja:tallo condicionan simultáneamente productividad y valor nutritivo (15,16). Este principio es especialmente importante cuando el forraje se destina a conservación como ensilaje, debido a que la concentración de proteína bruta y la proporción de fibra determinan parte del valor alimenticio.

En Paraguay, las pasturas cultivadas se han expandido para complementar o reemplazar recursos nativos de menor productividad estacional. Sin embargo, la información experimental local sobre respuesta de *Brachiaria/Urochloa* a N en Entisoles es escasa y suele estar dispersa en informes técnicos. Los Entisoles de textura más arenosa pueden presentar baja materia orgánica, baja capacidad de retención de nutrientes y respuesta variable al aporte de fertilizantes; por lo tanto, la evaluación local es indispensable antes de recomendar dosis de uso general. Además, los costos de urea y semilla, junto con la posibilidad de vender forraje como ensilaje,

condicionan la adopción por pequeños y medianos productores.

Este estudio se realizó en Pilar, departamento de Ñeembucú, con el propósito de determinar el comportamiento de cuatro genotipos de *Brachiaria/Urochloa* bajo cuatro niveles de fertilización nitrogenada durante dos ciclos. La hipótesis fue que el aumento de N elevaría la producción de materia seca y la proteína bruta, pero que la magnitud de respuesta dependería del genotipo y del ciclo, generando diferencias en el retorno económico. El objetivo específico fue integrar la evaluación agronómica, bromatológica y económica para identificar alternativas de manejo compatibles con sistemas de producción forrajera en Entisoles subtropicales.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en la Escuela Agrícola San Isidro Labrador, ubicada en Pilar, departamento de Ñeembucú, Paraguay. La zona presenta clima subtropical húmedo con estacionalidad térmica marcada; durante el periodo evaluado la temperatura aumentó desde septiembre y alcanzó máximos estivales en enero, mientras que los meses de junio y julio registraron condiciones más frías y menor precipitación. La precipitación acumulada entre octubre de 2011 y octubre de 2012 fue de 1316,4 mm,

con distribución temporal suficiente para sostener crecimiento estival, aunque con restricciones relativas en la estación fría. Esta variación climática resulta relevante

porque las gramíneas C4 expresan mayor crecimiento con temperaturas altas, pero su persistencia durante el periodo frío depende del genotipo y del estado nutricional.

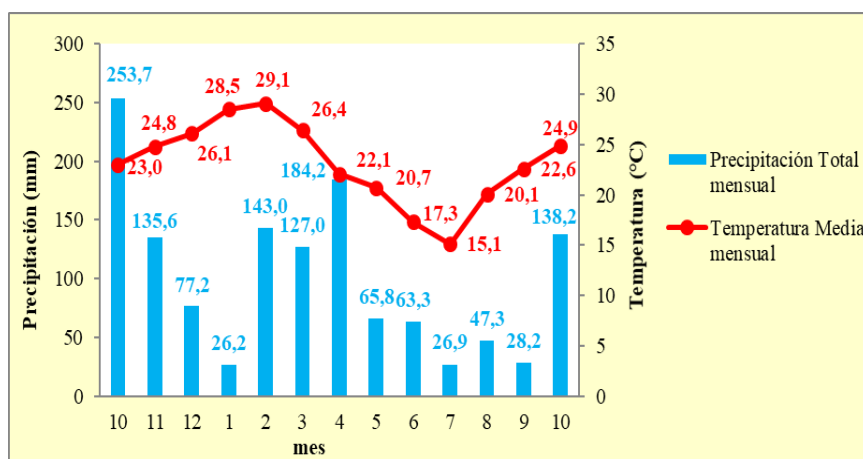


Figura 1. Precipitación y temperatura media mensual en Pilar, Ñeembucú, durante el periodo experimental.

Suelo y caracterización inicial

Antes de la siembra se colectaron muestras de suelo para análisis químico en el Centro Tecnológico Agropecuario del Paraguay. El suelo fue clasificado operacionalmente como Entisol, con bajo contenido de arcilla y limitaciones típicas de baja capacidad de reserva. A partir de las bases intercambiables se calcularon la suma de bases, la capacidad de intercambio catiónico, la saturación por bases, la saturación por

aluminio y la capacidad de intercambio catiónico efectiva. El suelo presentó fósforo disponible alto según el criterio analítico del laboratorio, bajo contenido de potasio, calcio, magnesio y materia orgánica, saturación por bases relativamente alta y ausencia de aluminio intercambiable. Por ello no se aplicaron fertilizantes fosfatados ni potásicos, decisión que debe interpretarse como una condición específica del ensayo y no como recomendación general.

Tabla 1. Indicadores químicos iniciales del suelo utilizado para el ensayo de cuatro genotipos de *Brachiaria/Urochloa* en Pilar, Paraguay. Los valores proceden del análisis original del manuscrito base.

Atributo del suelo	Valor reportado	Interpretación agronómica
Materia orgánica	1,26%	Baja; limita mineralización sostenida de N
Suma de bases	3,67 cmolc kg ⁻¹	Moderada para el contexto textural
CIC total	5,56 cmolc kg ⁻¹	Baja a moderada, coherente con Entisol arenoso
Saturación por bases	66,0%	Relativamente alta
Saturación por Al	0,0%	Sin restricción por Al intercambiable
CIC efectiva	3,67 cmolc kg ⁻¹	Baja reserva de cationes intercambiables

Tratamientos y diseño experimental

Se evaluaron cuatro genotipos forrajeros: *Brachiaria decumbens*, *B. brizantha*, *B. brizantha* MG4 y *B. brizantha* MG5. Aunque se conserva la nomenclatura comercial utilizada por los productores, en sentido taxonómico actual estos materiales se integran al complejo *Urochloa*. Los tratamientos de fertilización fueron 0, 100, 200 y 300 kg N ha⁻¹, aplicados como urea. El arreglo experimental correspondió a parcelas divididas en diseño aleatorizado con tres repeticiones, considerando genotipos y dosis de N como factores principales de interés. Cada unidad experimental tuvo 4 m² (2 × 2 m), con separación de 1 m entre unidades y bloques, en un área total aproximada de 481 m².

El ensayo comprendió dos ciclos de evaluación. El primer ciclo incluyó establecimiento y primer aprovechamiento,

mientras que el segundo permitió observar rebrote, persistencia relativa y comportamiento bajo condiciones térmicas más restrictivas. Esta separación por ciclos es fundamental porque las respuestas de gramíneas perennes a N no solo dependen de la biomasa instantánea, sino también de reservas, densidad de macollos, arquitectura del dosel y capacidad de recuperación luego del corte (15,16).

Variables evaluadas

El rendimiento de materia seca se determinó por corte del forraje y corrección por contenido de humedad. La proteína bruta se analizó en laboratorio después de la cosecha y se expresó como porcentaje de la materia seca. Para la interpretación de calidad se consideró que la fertilización nitrogenada puede aumentar la concentración de N en tejidos, pero también puede producir efectos de dilución cuando el incremento de biomasa supera la acumulación proporcional de N (11,12).

La evaluación económica se realizó para cada genotipo y dosis considerando la venta hipotética del forraje como ensilaje. Se empleó un precio del forraje de 0,036 US\$ kg⁻¹, un costo de N de 1,62 US\$ kg⁻¹, equivalente al costo de urea informado en el ensayo, y una proporción comercializable del 90% del rendimiento, asumiendo 10% de pérdidas durante cosecha y manejo. En el primer ciclo se

incorporaron costos de establecimiento y semilla; en el segundo se excluyeron arado y rastra, de acuerdo con el cálculo original. Este enfoque permite comparar tratamientos desde la perspectiva de margen parcial, aunque no sustituye análisis financieros con sensibilidad a precios, mano de obra, maquinaria y costo de oportunidad.

Tabla 2. Supuestos usados para la evaluación económica parcial del forraje producido como ensilaje.

Componente del análisis económico	Valor empleado	Observación
Precio del forraje como ensilaje	0,036 US\$ kg ⁻¹	Aplicado al 90% del rendimiento
Pérdida asumida en cosecha	10%	Descuento del volumen vendible
Costo del N	1,62 US\$ kg ⁻¹ N	Calculado a partir del precio de urea informado
Semilla de B. decumbens	181 US\$ ha ⁻¹	Solo primer ciclo
Semilla de B. brizantha	120 US\$ ha ⁻¹	Solo primer ciclo
Semilla de B. brizantha MG4	146 US\$ ha ⁻¹	Solo primer ciclo
Semilla de B. brizantha MG5	157 US\$ ha ⁻¹	Solo primer ciclo

Análisis estadístico

El manuscrito original reportó análisis de varianza y comparación de medias mediante prueba de Duncan al 5%. En esta versión mejorada se recomienda explicitar el modelo estadístico completo como: ciclo, genotipo, dosis de N y sus interacciones como efectos fijos, bloque como efecto aleatorio y parcela experimental como unidad de error. Cuando se disponga de la base de datos, sería preferible ajustar

modelos mixtos, verificar normalidad y homogeneidad de varianzas, y explorar respuestas lineales o cuadráticas a N, práctica habitual en ensayos de fertilización (10,14). Dado que la base de datos numérica no acompañó el documento fuente, la presente versión mantiene los resultados significativos y tendencias reportadas, evitando recalcular estimadores no verificables.

Para una eventual sumisión

internacional, también se recomienda reportar el tamaño del efecto, el error estándar de la media y los intervalos de confianza de 95%, además de los valores de *P*. La presentación exclusiva de letras de comparación múltiple es común en informes agronómicos, pero puede ser insuficiente para lectores que desean evaluar precisión, variabilidad experimental y magnitud biológica de las diferencias. En ensayos de fertilización, la combinación de ANOVA con modelos de regresión permite identificar el punto de máxima respuesta técnica y, cuando se incorpora el precio del fertilizante, el punto de máxima eficiencia económica. Esta distinción es importante porque la dosis que maximiza biomasa puede superar la dosis que maximiza margen neto, especialmente cuando la eficiencia de uso del N disminuye a niveles altos de fertilización (12,14).

RESULTADOS

Rendimiento de materia seca

El rendimiento de materia seca respondió al N aplicado y a la interacción

ciclo × genotipo. En el análisis conjunto de los dos ciclos se reportó diferencia significativa al 1% para N y al 5% para la interacción ciclo × *Brachiaria*. Esto confirma que la fertilización nitrogenada modificó el potencial productivo, pero también que la respuesta no fue uniforme entre materiales ni estable entre ciclos.

En el primer ciclo, *B. brizantha* MG5 presentó el mayor rendimiento relativo, con desempeño destacado a 200 kg N ha⁻¹. Este comportamiento sugiere una alta capacidad de crecimiento inicial cuando coinciden temperatura favorable, disponibilidad hídrica y aporte de N. Sin embargo, el segundo ciclo mostró un patrón diferente: *B. decumbens* y *B. brizantha* MG4 superaron su rendimiento del primer ciclo en todos los niveles de N, mientras que MG5 redujo su desempeño relativo. En *B. brizantha*, el segundo ciclo fue superior entre 0 y 200 kg N ha⁻¹, pero a 300 kg N ha⁻¹ el primer ciclo mantuvo un rendimiento ligeramente mayor.

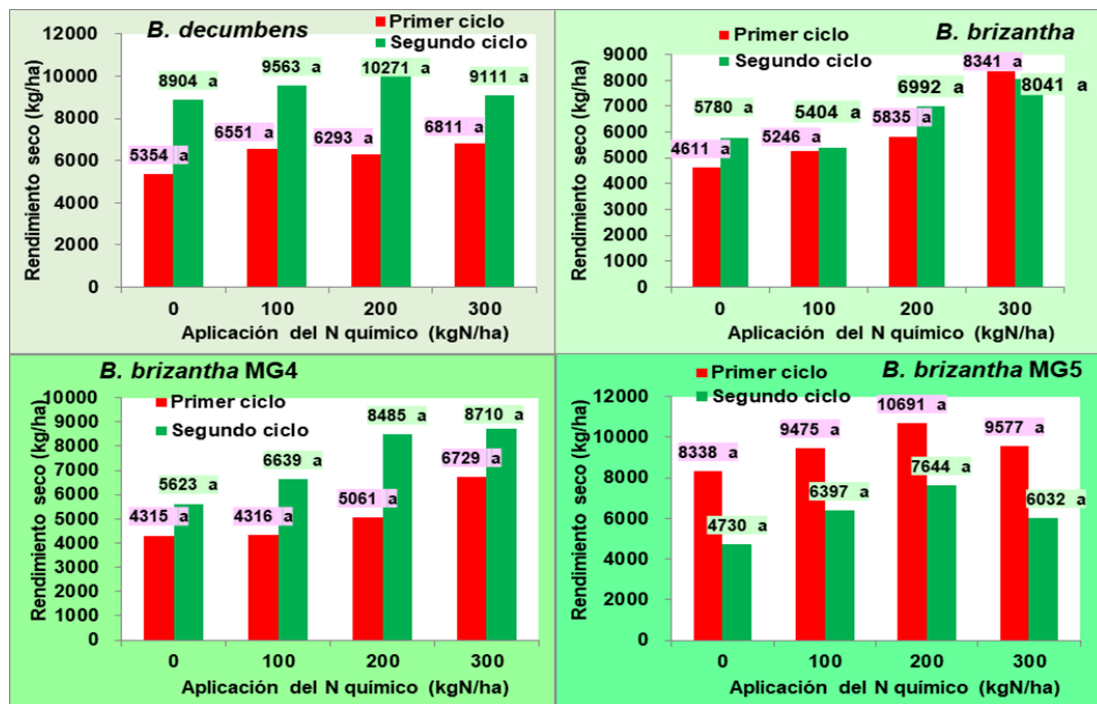


Figura 2. Rendimiento de materia seca de cuatro genotipos de *Brachiaria/Urochloa* bajo 0, 100, 200 y 300 kg N ha⁻¹ en dos ciclos de cultivo. Las letras deben indicar diferencias según Duncan al 5%, conforme al análisis original.

La mayor estabilidad de *B. decumbens* en el segundo ciclo es agrónomicamente relevante. En condiciones subtropicales con periodos fríos, la productividad no depende solamente de la respuesta inmediata a fertilización, sino de la capacidad del genotipo para conservar cobertura, rebrotar y sostener actividad meristemática. Este resultado coincide con la literatura que destaca la importancia de evaluar persistencia y estructura del dosel, además del rendimiento puntual (15,16). La respuesta de MG5 en el primer ciclo, en cambio, indica potencial productivo bajo condiciones ambientales favorables, pero también mayor sensibilidad a cambios estacionales.

Proteína bruta

La proteína bruta presentó diferencias significativas al 1% para ciclo, genotipo, N y sus interacciones. En *B. decumbens*, el porcentaje de proteína bruta fue menor en el segundo ciclo que en el primero en todos los tratamientos, a pesar de que el rendimiento seco aumentó, lo que sugiere un efecto de dilución. En *B. brizantha*, la proteína bruta del segundo ciclo superó a la del primero principalmente con 300 kg N ha⁻¹. En MG5, el primer ciclo mantuvo valores superiores al segundo bajo dosis equivalentes, coherente con su mayor crecimiento inicial y con la probable interacción entre temperatura, absorción de N y acumulación de biomasa.

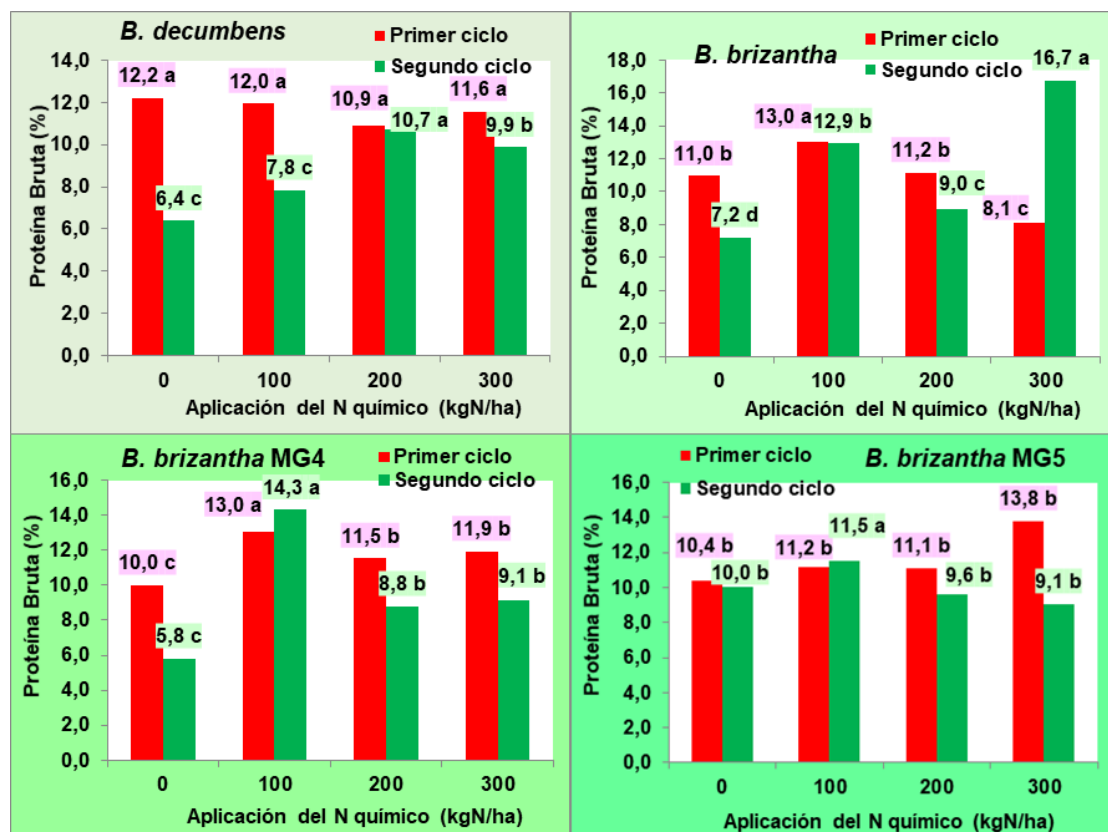


Figura 3. Concentración de proteína bruta de cuatro genotipos de *Brachiaria/Urochloa* bajo dosis crecientes de N durante dos ciclos de cultivo. La figura debe presentar medias y letras de comparación múltiple reportadas en el análisis original.

Estos resultados demuestran que la concentración proteica no puede interpretarse de manera aislada. Un tratamiento puede mostrar alta proteína por menor biomasa acumulada, efecto de concentración, o proteína moderada con mayor producción total de N cosechado. En sistemas ganaderos, la decisión debe integrar ambos componentes: porcentaje de proteína, rendimiento de materia seca y requerimientos del animal. Estudios recientes en Marandu demostraron que el N puede modificar fracciones proteicas y de carbohidratos, con implicaciones directas para la fermentación ruminal y la eficiencia de utilización del N (11).

Evaluación económica

La evaluación económica mostró diferencias claras entre ciclos. En el primer ciclo, el mayor ingreso neto puntual se observó en *B. brizantha* MG5 sin N, con aproximadamente 909 US\$ ha⁻¹, resultado atribuible al alto crecimiento inicial y a la ausencia de costo de fertilizante. Sin embargo, al considerar el segundo ciclo y la suma acumulada, *B. decumbens* con 300 kg N ha⁻¹ obtuvo el mayor ingreso neto. En el segundo ciclo, *B. decumbens* sin N alcanzó aproximadamente 451 US\$ ha⁻¹, destacando la importancia de su persistencia y de la reducción de costos de establecimiento.

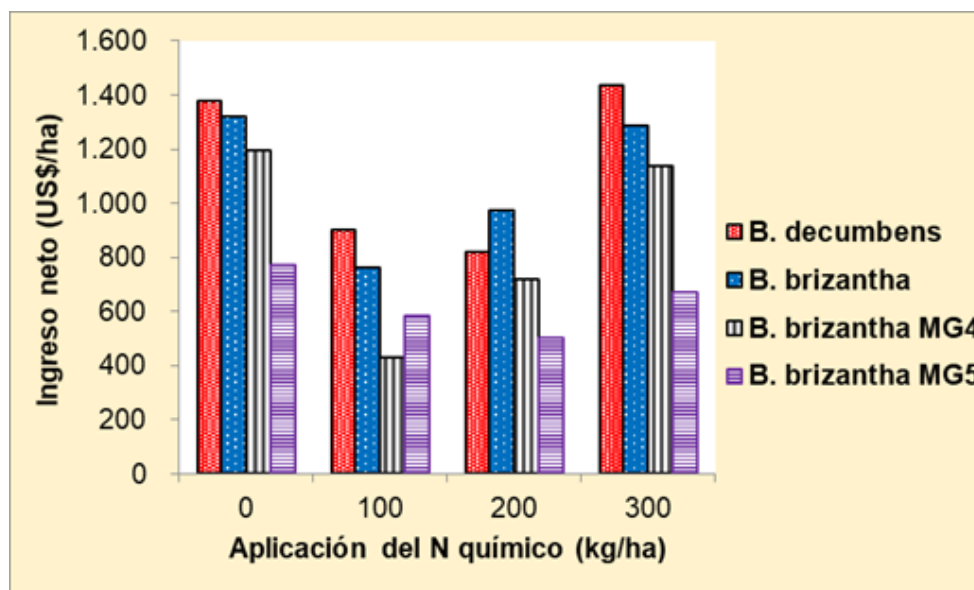


Figura 4. Ingreso neto acumulado de dos ciclos para cuatro genotipos de *Brachiaria/Urochloa* bajo dosis crecientes de N, considerando venta del forraje como ensilaje, costo de urea, costos fijos y pérdidas de cosecha.

El cambio de ranking entre primer ciclo y acumulado de dos ciclos evidencia por qué la recomendación de fertilización no debe basarse en una sola cosecha. Un genotipo de alta respuesta inicial puede no maximizar el retorno si pierde estabilidad en el rebrote o si la dosis de N aumenta el costo sin traducirse en biomasa vendible. De igual forma, dosis altas pueden ser rentables cuando el aumento de producción compensa el fertilizante, pero pueden reducir la eficiencia fisiológica y elevar riesgos ambientales si no se ajustan a demanda real del cultivo (12,13,17).

Discusión

Los resultados confirman que la productividad de *Brachiaria/Urochloa* en

Entisol subtropical está determinada por una interacción compleja entre fertilización nitrogenada, genotipo y ciclo de cultivo. La respuesta positiva al N era esperable, dado que las gramíneas C4 presentan alta demanda de este nutriente para sostener fotosíntesis, macollamiento y expansión foliar (15,16). Sin embargo, la magnitud de respuesta y su traducción en proteína bruta y retorno económico variaron considerablemente, lo cual coincide con evidencias de que la eficiencia del N disminuye a medida que aumentan las dosis y que el manejo debe optimizarse según el objetivo productivo (10,12,14).

La ventaja inicial de MG5 a 200 kg N ha⁻¹ puede explicarse por una combinación

de vigor de establecimiento, condiciones estivales favorables y disponibilidad de N mineral. No obstante, su menor desempeño en el segundo ciclo sugiere sensibilidad a bajas temperaturas o a restricciones hídricas, además de posibles diferencias en reservas y rebrote. La ecofisiología de gramíneas C4 indica que el crecimiento posterior al corte depende de la recuperación del área foliar, la activación de meristemas y la disponibilidad de carbohidratos y N (15). Por tanto, materiales con alta producción inicial no necesariamente son los más estables si el ambiente posterior limita la recuperación.

La superioridad acumulada de *B. decumbens* bajo 300 kg N ha⁻¹ debe interpretarse con prudencia. Desde el punto de vista económico del ensayo, esta combinación maximizó el ingreso neto acumulado como ensilaje. Sin embargo, desde el punto de vista agronómico y ambiental, dosis altas de N requieren manejo cuidadoso para minimizar volatilización de amoníaco, lixiviación de nitrato y emisiones de N₂O. La literatura sobre fertilizantes nitrogenados de eficiencia mejorada y ureasa inhibida muestra que la tecnología de aplicación puede reducir pérdidas, pero su beneficio depende de suelo, humedad, temperatura y oportunidad de aplicación (18,19). En sistemas de pasturas, las pérdidas asociadas a excretas y a la

redistribución espacial del N también pueden acelerar degradación cuando aumenta la carga animal sin manejo de cobertura (7–9). Cuando se cuantifican gases de efecto invernadero, la estandarización del horario de muestreo y del método de cámaras estáticas es crítica para evitar sesgos en el flujo diario estimado de N₂O (25).

La proteína bruta mostró un patrón particularmente útil para la formulación de recomendaciones. El efecto de dilución observado en algunos tratamientos confirma que mayor biomasa no garantiza mayor concentración proteica. Esto es consistente con estudios donde la fertilización incrementa simultáneamente masa y proteína, pero con respuestas no proporcionales entre tejidos y fracciones químicas (11). En sistemas de conservación, la calidad del forraje cosechado debe evaluarse junto con materia seca total, digestibilidad y fibra, dado que una alta producción con bajo valor nutritivo puede disminuir consumo o requerir suplementación adicional. Aunque el presente ensayo no midió fibra detergente neutra ni digestibilidad, estos indicadores deberían incorporarse en futuras investigaciones para cumplir estándares de revistas Q1 y para fortalecer inferencias sobre desempeño animal. Además, en sistemas integrados o de pastoreo, el manejo de la carga animal puede contribuir al reciclaje de nutrientes y al mejoramiento del suelo cuando se regula la

intensidad de defoliación y se mantiene cobertura suficiente (23).

El estado inicial del suelo ayuda a interpretar la respuesta. La materia orgánica de 1,26% indica limitada capacidad de mineralización, mientras que la baja CIC propia del Entisol reduce la reserva de nutrientes. El fósforo disponible alto y la ausencia de aluminio intercambiable disminuyeron algunas restricciones, pero el bajo K, Ca, Mg y la baja materia orgánica sugieren que la respuesta al N podría cambiar si otros nutrientes se vuelven limitantes. En sistemas tropicales, *Urochloa* puede mejorar reciclaje de nutrientes, estructura del suelo y actividad biológica, especialmente por su sistema radical profundo (4,6,20). La valoración de servicios ecosistémicos de coberturas forrajeras, incluida la conservación del suelo y el ciclado de nutrientes, permite incorporar beneficios no capturados por el margen económico inmediato (24). Sin embargo, esas funciones no sustituyen la reposición de nutrientes exportados cuando el forraje se corta y se retira del potrero.

La comparación con investigaciones regionales muestra coherencia general. Delevatti et al. (10) reportaron que dosis crecientes de N en Marandu elevaron masa de forraje, proteína bruta, tasa de acumulación, carga animal y ganancia por hectárea, pero la mayor ganancia diaria

individual ocurrió con una dosis relativamente baja. Sales et al. (14) también discutieron la existencia de un límite máximo agronómico para la fertilización de Marandu. Leite et al. (11) demostraron que el N modifica componentes nutricionales más allá del porcentaje de proteína. En conjunto, estos estudios respaldan que las recomendaciones deben formularse como rangos condicionados por sistema de uso, clima, suelo, precio del fertilizante y objetivo, corte, pastoreo, ensilaje o integración agrícola, no como dosis universales.

Desde el punto de vista del productor, la interpretación práctica debe iniciar con una pregunta operativa: si el sistema busca producir forraje conservado, el indicador central es la materia seca vendible corregida por pérdidas y costo de cosecha; si el objetivo es pastoreo, la respuesta debe expresarse como carga animal, ganancia por animal, ganancia por hectárea y estabilidad del dosel; si el sistema integra cultivos, interesa además la cantidad de residuos, la competencia con el cultivo principal y la liberación posterior de nutrientes (20,21). En este ensayo, el supuesto de venta como ensilaje permitió comparar tratamientos con una métrica económica sencilla, pero la recomendación final para fincas debería incluir disponibilidad de maquinaria, distancia al mercado, capacidad de almacenamiento, calidad fermentativa esperada y demanda local de

forraje. Una dosis de 300 kg N ha⁻¹ puede ser atractiva cuando el precio del forraje es alto y la respuesta en biomasa es fuerte; sin embargo, puede volverse riesgosa si aumenta el precio de la urea, si ocurren pérdidas por volatilización, o si el ciclo climático reduce la conversión del N aplicado en materia seca cosechable (18,19).

Los beneficios potenciales de *Urochloa* exceden el rendimiento directo. Como cobertura o componente de sistemas integrados, estas gramíneas pueden proteger el suelo, recuperar nutrientes de capas profundas, aportar carbono y modificar la microbiota relacionada con procesos de N (4,6,20). En sistemas de maíz intercalado con gramíneas tropicales, la fertilización con N ha sido asociada con mayores rendimientos y con alternativas para aumentar producción estimada de carne por unidad de área (21). Asimismo, estudios de largo plazo muestran que las gramíneas forrajeras pueden dirigir procesos microbianos del N y modificar la composición del microbioma del suelo (6). Estas funciones ecosistémicas son relevantes para Paraguay, donde la intensificación ganadera debe evitar degradación y pérdida de cobertura.

Desde una perspectiva de cambio climático, la selección de genotipos estables y el ajuste de fertilización son estrategias de adaptación. La variabilidad de precipitación y

temperatura afecta directamente el crecimiento de gramíneas C4; por ello, evaluar varios genotipos en el mismo sitio, como en este estudio, ayuda a distribuir riesgo. Además, la intensificación basada en pasturas puede reducir presión sobre expansión de área si aumenta la productividad por hectárea, pero solo será sostenible si evita pérdidas de N y mantiene carbono y estructura del suelo (2,12,22). La literatura reciente plantea que la intensificación de pasturas de *Brachiaria* puede mejorar simultáneamente productividad animal e indicadores ambientales cuando combina fertilización, manejo de pastoreo y eficiencia de uso de insumos (26). El enfoque de margen económico parcial incorporado aquí es un primer paso, aunque debe ampliarse con análisis de sensibilidad y con indicadores ambientales para orientar decisiones de política y extensión.

El estudio presenta limitaciones que deben reconocerse. Primero, la base de datos numérica completa no estuvo disponible para recalcular modelos estadísticos, intervalos de confianza o curvas de respuesta. Segundo, el experimento se realizó en un solo sitio y periodo, lo que limita la extrapolación a otros Entisoles o condiciones climáticas. Tercero, las variables bromatológicas se limitaron a proteína bruta; futuras evaluaciones deberían incluir fibra detergente neutra, fibra

detergente ácida, digestibilidad in vitro, carbohidratos solubles y producción de proteína por hectárea. Cuarto, la evaluación económica asumió precios constantes y venta como ensilaje, por lo que se requieren escenarios con variación de precio de urea, costo de cosecha, transporte y valor nutricional del forraje. Quinto, no se midieron pérdidas de N ni indicadores de suelo posteriores al cultivo, por lo que la sostenibilidad del tratamiento de mayor retorno económico no puede inferirse únicamente a partir de ingresos netos. Para fortalecer futuras versiones, sería conveniente incluir balance parcial de N, recuperación aparente del fertilizante, eficiencia agronómica, mediciones de cobertura residual, densidad de macollos y, cuando sea viable, emisiones de N_2O mediante protocolos estandarizados (17,25).

A pesar de estas limitaciones, el estudio aporta información local valiosa. En regiones donde los productores adoptan pasturas mejoradas con escasa experimentación previa, ensayos de pequeña escala permiten reducir incertidumbre antes de inversiones mayores. Esta lógica coincide con recomendaciones de manejo adaptativo: probar genotipos y dosis en condiciones reales, medir productividad y calidad, y ajustar la fertilización con base en respuesta marginal. Para Ñeembucú, los datos sugieren que *B.*

decumbens ofrece estabilidad y retorno acumulado, mientras que MG5 puede ser promisorio en ambientes cálidos y con manejo oportuno, pero menos seguro bajo enfriamiento o restricciones del segundo ciclo.

CONCLUSIONES

La fertilización nitrogenada modificó significativamente la producción de materia seca de cuatro genotipos de *Brachiaria/Urochloa* en un Entisol subtropical de Pilar, y su efecto dependió del ciclo de cultivo y del material evaluado. En el primer ciclo, *B. brizantha* MG5 presentó el mayor rendimiento, con respuesta destacada a 200 kg N ha⁻¹, mientras que en el segundo ciclo *B. decumbens* expresó mayor estabilidad productiva y mejor desempeño relativo.

La proteína bruta fue afectada por ciclo, genotipo, dosis de N e interacciones, mostrando que la calidad nutricional no responde de forma lineal ni uniforme al aumento de fertilización. Los patrones observados sugieren efectos de dilución en materiales con alta biomasa y efectos de concentración cuando el crecimiento disminuye, por lo que las recomendaciones deben integrar rendimiento total, concentración proteica y uso final del forraje.

Desde el punto de vista económico, *B. decumbens* con 300 kg N ha⁻¹ generó el mayor ingreso neto acumulado de los dos

ciclos bajo el supuesto de venta del forraje como ensilaje. No obstante, la conveniencia de esta dosis debe validarse con análisis de sensibilidad de precios y con prácticas que reduzcan pérdidas de N. Para productores de Ñeembucú, se recomienda priorizar evaluaciones locales previas, seleccionar genotipos por estabilidad y no solo por rendimiento inicial, e incorporar análisis de calidad forrajera más completos en futuros ensayos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Escuela Agrícola San Isidro Labrador por facilitar el sitio experimental y al Centro Tecnológico Agropecuario del Paraguay por los análisis de suelo y proteína bruta. Esta versión incorpora mejoras de estructura, redacción científica y actualización bibliográfica para adecuar el manuscrito a estándares editoriales internacionales.

Declaración de disponibilidad de datos

Los datos resumidos proceden del manuscrito original. Para evaluación por pares en una revista Q1 se recomienda anexar la matriz de datos crudos, el código estadístico y las figuras redibujadas en formato vectorial o alta resolución.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

REFERENCIAS

1. Thornton PK. Livestock production: recent trends, future prospects. *Philos Trans R Soc B Biol Sci.* 2010;365(1554):2853-2867. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0134>.
2. Herrero M, Havlík P, Valin H, Notenbaert A, Rufino MC, Thornton PK, et al. Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2013;110(52):20888-20893. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308149110>.
3. Gil J, Siebold M, Berger T. Adoption and development of integrated crop-livestock-forestry systems in Mato Grosso, Brazil. *Agric Ecosyst Environ.* 2015;199:394-406. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.008>.
4. Baptistella JLC, Andrade SAL, Favarin JL, Mazzafera P. Urochloa in tropical agroecosystems. *Front Sustain Food Syst.* 2020;4:119. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00119>.
5. Ferreira RCU, Moraes ACL, Chiari L, Barrios SCL, do Valle CB, Jank L, et al. An overview of the genetics and genomics of the Urochloa species most commonly used in pastures. *Front Plant Sci.* 2021;12:770461. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.770461>.
6. Momesso L, Crusciol CAC, Leite MFA, Bossolani JW, Kuramae EE. Forage grasses steer soil nitrogen processes, microbial populations, and microbiome composition in a long-term tropical agriculture system. *Agric Ecosyst Environ.* 2022;323:107688. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107688>.

7. Boddey RM, Macedo R, Tarré RM, Ferreira E, de Oliveira OC, Rezende CP, et al. Nitrogen cycling in Brachiaria pastures: the key to understanding the process of pasture decline. *Agric Ecosyst Environ.* 2004;103(2):389-403.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.010>.
8. Cantarutti RB, Tarré RM, Macedo R, Cadisch G, Rezende CP, Pereira JM, et al. The effect of grazing intensity and the presence of a forage legume on nitrogen dynamics in Brachiaria pastures in the Atlantic forest region of the south of Bahia, Brazil. *Nutr Cycl Agroecosyst.* 2002;64:257-271.
<https://doi.org/10.1023/A:1021415915804>.
9. Xavier DF, Léo FJS, Paciullo DSC, Urquiaga S, Alves BJR, Boddey RM. Nitrogen cycling in a Brachiaria-based silvopastoral system in the Atlantic forest region of Minas Gerais, Brazil. *Nutr Cycl Agroecosyst.* 2014;99:45-62.
<https://doi.org/10.1007/s10705-014-9617-x>.
10. Delevatti LM, Cardoso AS, Barbero RP, Leite RG, Romanzini EP, Ruggieri AC, et al. Effect of nitrogen application rate on yield, forage quality, and animal performance in a tropical pasture. *Sci Rep.* 2019;9:7596.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-44138-x>.
11. Leite RG, Cardoso AS, Fonseca NVB, Silva MLC, Tedeschi LO, Delevatti LM, et al. Effects of nitrogen fertilization on protein and carbohydrate fractions of Marandu palisadegrass. *Sci Rep.* 2021;11:14786.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-94098-4>.
12. Pereira LET, Herling VR, Tech ARB. Current scenario and perspectives for nitrogen fertilization strategies on tropical perennial grass pastures: a review. *Agronomy.* 2022;12(9):2079.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12092079>.
13. Silva DRG, Costa KAP, Faquin V, Oliveira IP, Bernardes TF. Rates and sources of nitrogen in the recovery of the structural and productive characteristics of marandu grass. *Rev Cienc Agron.* 2013;44(1):184-191.
<https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000100023>.
14. Sales KC, Cabral CEA, Abreu JG, Barros LV, Silva FG, Silva Junior JG, et al. What is the maximum nitrogen in marandu palisadegrass fertilization? *Grassl Sci.* 2020;66(3):153-160.
<https://doi.org/10.1111/grs.12266>.
15. Domiciano LF, Santos ML, Boote KJ, Pedreira CGS, Pereira DH, Pedreira BC. Physiological responses and forage accumulation of Marandu palisadegrass and Mombaça guineagrass to nitrogen fertilizer in the Brazilian forage-based systems. *Grassl Sci.* 2021;67(2):93-101.
<https://doi.org/10.1111/grs.12291>.
16. Da Silva SC, Sbrissia AF, Pereira LET. Ecophysiology of C4 forage grasses—understanding plant growth for optimising their use and management. *Agriculture.* 2015;5(3):598-625.
<https://doi.org/10.3390/agriculture5030598>.
17. Byrnes RC, Núñez J, Arenas L, Rao I, Trujillo C, Alvarez C, et al. Biological nitrification inhibition by Brachiaria grasses mitigates soil nitrous oxide emissions from bovine urine patches. *Soil Biol Biochem.* 2017;107:156-163.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.12.029>.
18. Silva AG, Sequeira CH, Sermarini RA, Otto R. Urease inhibitor NBPT on ammonia volatilization and crop productivity: a meta-analysis. *Agron J.* 2017;109(1):1-13.
<https://doi.org/10.2134/agronj2016.04.0200>.
19. Cantarella H, Otto R, Soares JR, Silva AGB. Agronomic efficiency of NBPT as a

urease inhibitor: a review. *J Adv Res.* 2018;13:19-27.

<https://doi.org/10.1016/j.jare.2018.05.008>.

20. Tanaka KS, Crusciol CAC, Soratto RP, Momesso L, Costa CHM, Franzluebbbers AJ. Nutrients released by Urochloa cover crops prior to soybean. *Nutr Cycl Agroecosyst.* 2019;113:267-281.

<https://doi.org/10.1007/s10705-019-09980-5>.

21. Crusciol CAC, Mateus GP, Momesso L, Pariz CM, Castilhos AM, Calonego JC, et al. Nitrogen-fertilized systems of maize intercropped with tropical grasses for enhanced yields and estimated land use and meat production. *Front Sustain Food Syst.* 2020;4:544853.

<https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.544853>.

22. Carnevalli RA, Sollenberger LE, Pedreira CGS, Silva SC, Pereira LET, Santos PM, et al. Herbage and animal responses to grazing intensity in *Brachiaria brizantha*. *Agron J.* 2006;98(4):1044-1050.

<https://doi.org/10.2134/agronj2005.0257>.

23. Carvalho PCF, Anghinoni I, Moraes A, Souza ED, Sulc RM, Lang CR, et al. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. *Nutr Cycl Agroecosyst.* 2010;88:259-273.

<https://doi.org/10.1007/s10705-010-9360-x>.

24. Daryanto S, Jacinthe PA, Fu B, Zhao W, Wang L. Valuing the ecosystem services of cover crops: barriers and pathways forward. *Agric Ecosyst Environ.* 2019;270-271:76-78.

<https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.10.021>.

25. Alves BJR, Smith KA, Flores RA, Cardoso AS, Oliveira WRD, Jantalia CP, et al. Selection of the most suitable sampling time for static chambers for the estimation of daily mean N₂O flux from soils. *Soil Biol Biochem.* 2012;46:129-135.

<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.11.022>.

26. Cardoso AS, Barbero RP, Romanzini EP, Teobaldo RW, Ongaratto F, Fernandes MHP, et al. Intensification: a key strategy to achieve great animal and environmental beef cattle production sustainability in *Brachiaria* grasslands. *Sustainability.* 2020;12(16):6656.

<https://doi.org/10.3390/su12166656>.