

Meta-análisis para la calibración y validación de un modelo matemático de respuesta a la fertilización nitrogenada de pasturas cultivadas*

Quintero, C. E.¹, Quinodoz, J. E.¹, Lezana, L.^{1,2}, Pautasso, J. M.^{1,2}, Re, A.³

Autores: **1.** Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER). **2.** Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Agropecuaria Paraná **3.** Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Agropecuaria Concepción del Uruguay
Contacto: cesar.quintero@uner.edu.ar

ARK: <https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s22504559/uzjng64qz>

RESUMEN

Las pasturas cultivadas en Argentina proveen de alimento a los sistemas ganaderos de diferentes regiones del país. Sin embargo, la productividad de forraje generalmente está limitada por la disponibilidad de nitrógeno. El objetivo de éste trabajo fue sintetizar y analizar la información disponible sobre fertilización nitrogenada de pasturas cultivadas, como base para cuantificar la respuesta y orientar recomendaciones de fertilización. Mediante una búsqueda bibliográfica se conformó una base de datos de ensayos ya realizados, publicados o no, con más de 400 registros. Luego se realizó un meta-análisis utilizando diferentes herramientas estadísticas.

La productividad de forraje estuvo determinada por el cultivo antecesor, la fertilidad del suelo, la especie forrajera y la dosis de nitrógeno aplicada, variando de 2,3 a 7,4 Mg/ha. La mayor eficiencia de uso del nitrógeno (35 kg MS/kg N) se observó con dosis de N menores a 68 kg/ha en suelos por debajo de 3.5 % de materia orgánica y la menor (8 kg MS/kg N) con dosis de N mayores a 68 kg/ha, cultivados con leguminosas y gramíneas consociadas.

Este meta-análisis ha permitido sintetizar la información disponible sobre fertilización nitrogenada en pasturas estableciendo algunas pautas para comprender mejor las condiciones que promueven una mayor productividad de materia seca y la respuesta al nitrógeno.

Palabras clave: Forrajes – Fertilización – Nitrógeno – Eficiencia – Meta-análisis

* Algunos de los pasajes de esta reseña fueron publicados en una versión anterior como artículo científico en la Revista Argentina de Producción Animal. Vol 44 N° 1: 13-28.

INTRODUCCIÓN

Objetivos propuestos y cumplidos

Se entiende por pasturas cultivadas a todas las especies forrajeras, anuales o perennes, de invierno o de verano, gramíneas o leguminosas, puras o consociadas que se cultivan para el pastoreo directo o forraje conservado. Dejando de lado a las especies naturales, salvajes o espontáneas.

Las pasturas cultivadas comprenden una superficie de 7,4 millones de hectáreas en Argentina y proveen de forraje a los sistemas ganaderos de carne y leche en diferentes regiones del país. La mayor superficie de pasturas se concentra en la Región Pampeana, y es la principal fuente forrajera de un stock ganadero de 28,7 millones de cabezas (INDEC, 2021).

En general, la oferta de nutrientes del ambiente resulta insuficiente para satisfacer los requerimientos de las especies forrajeras. En los sistemas ganaderos de la región, basados en el pastoreo directo de pasturas cultivadas, los nutrientes que en mayor medida limitan la productividad, son el fósforo (P) y el nitrógeno (N) (García et al. 2002). La demanda de nutrientes está estrechamente asociada con la producción de forrajes, por lo que, para incrementar la productividad de biomasa por unidad de superficie, se debe recurrir a la fertilización (Rubio et al. 2013; Agnusdei et al. 2010). Sin embargo, en los planteos ganaderos de Argentina, la aplicación de fertilizantes es escasa y está menos difundida que en las actividades agrícolas, por lo que frecuentemente, las deficiencias nutricionales restringen la capacidad productiva de cada ambiente (Marino y Berardo, 2014) y si bien la fertilización en pasturas es una tecnología conceptualmente reconocida, su correcta aplicación (ejemplo: dosis de fertilizante, momento de aplicación, fuente de fertilizante) ha sido escasamente adoptada en la región (Agnusdei, 2012). Por otro lado, cultivos forrajeros mal nutridos no sólo producen menos que los fertilizados, sino también aportan menos carbono, generan menor calidad nutritiva e inician procesos de degradación de los suelos (Sheaffer et al. 2006; Marino y Berardo, 2014).

Las respuestas al agregado de nutrientes suelen ser mayores en los verdes de invierno que en los de verano, ya que su ciclo se desarrolla en un período de menores temperaturas, cuando la disponibilidad de los nutrientes es mínima por una menor mineralización de la materia orgánica (Echeverría y Bergonzi, 1995). Para verdes invernales como raigrás y avena se han reportado incrementos en la producción de forrajes con la aplicación de P y N (Scheneiter, 2013; Borrajo et al. 2006; Marino y Castaño, 2013; Fernández Grecco y Agnusdei, 2005, García et al. 2002), con eficiencias de uso del N entre 7 y 42 kg de materia seca (MS) por kilogramo de N agregado, para ambas especies.

Por otra parte, en términos económicos, conocer los umbrales de respuesta de los principales nutrientes y su interacción con factores ambientales, contribuye a orientar las recomendaciones técnicas a partir de un diagnóstico de fertilidad de pasturas, en pos de optimizar la relación insumo/producto en los sistemas ganaderos de carne y leche. En este sentido, la disponibilidad hídrica afecta directamente la respuesta a la fertilización (Lemaire & Gastal, 1997, Errecart et al. 2014).

En este sentido, cobra importancia el análisis de los modelos de respuesta entre la producción y el agregado de nutriente. En estos modelos, se identifica una zona de deficiencia, donde existen altas probabilidades de respuesta a la fertilización; una zona de suficiencia, donde con el incremento de las dosis se alcanza el máximo rendimiento; y, por encima del nivel de suficiencia, una zona de exceso de nutriente, donde el ren-

dimiento puede disminuir. Los modelos de respuesta, ajustados a una función matemática (Colwell, 1994), son la base de los modelos de diagnóstico de disponibilidad de nutrientes y recomendaciones de fertilización.

Si bien existe un importante caudal de información sobre respuesta a la fertilización de recursos forrajeros cultivados, tanto a escala regional como local, es necesario recopilar y analizar esa información para determinar el impacto relativo de diferentes fuentes de variación, tales como: especie forrajera, tipo de nutriente, dosis, fuente, momento de aplicación, suelo, clima, manejo del pastoreo, y así vincular la información basada en evidencia científica con recomendaciones técnicas (Fixen, 2016). En este sentido, una herramienta estadística como el meta-análisis, permite ajustar modelos cuantitativos a partir de los efectos y sus interacciones, analizando datos primarios, provenientes de una revisión sistemática (St-Pierre, 2001, Martín et al. 2008). Esta metodología, utilizada originalmente en ciencias sociales (Glass 1976), ha cobrado relevancia en diferentes áreas de estudio, como la medicina y la agronomía, debido a la potencialidad de sintetizar la evidencia acumulada en la investigación (Fixen 2006).

El objetivo de éste trabajo fue sintetizar y analizar la información disponible sobre fertilización nitrogenada de pasturas cultivadas anuales invernales y perennes consociadas de la Región Pampeana, como base para cuantificar la respuesta y orientar las recomendaciones de fertilización.

Bajo el supuesto que la disponibilidad de nitrógeno es una importante limitante regional de la productividad de pasturas cultivadas. Nuestra hipótesis implícita es que, al reunir una amplia base de datos, luego mediante un meta-análisis y correlaciones, podremos ajustar un modelo que explique satisfactoriamente la respuesta de las pasturas al nitrógeno.

Un incremento en la capacidad para predecir la respuesta de las pasturas a la aplicación de nitrógeno, es un punto crucial para determinar la producción y el beneficio económico del uso de fertilizantes nitrogenados asociado también al beneficio ambiental de un uso más eficiente del nitrógeno.

Marco teórico y metodológico

Meta-análisis

El meta-análisis (MA) es un conjunto de herramientas estadísticas útiles para sintetizar los datos de una colección de estudios. Se inicia recopilando estimaciones de un cierto efecto (expresado en un índice de tamaño del efecto, como la diferencia de medias tipificada, la razón de riesgo, o la correlación) de cada estudio. El MA permite valorar estos efectos en contexto: si el tamaño del efecto es consistente, el efecto del tratamiento puede ser considerado como fuerte y el tamaño del efecto se estima con mayor precisión que con un solo estudio. Si el tamaño del efecto varía, esa variación puede ser descrita y, potencialmente, explicada.

El término meta-análisis, como tal, fue inicialmente aplicado en las ciencias sociales y en psicología. A partir de la década de los 80, se comenzó a aplicar de forma creciente en medicina y a partir de los 90 son muy frecuentes los artículos que describen resultados de meta-análisis en publicaciones médicas (Manrique, 2002; Sandoya, 2008).

El MA es, por tanto, el proceso de síntesis de la evidencia científica disponible sobre una situación particular de interés, que, mediante la expresión cuantitativa de los resultados, permite tomar decisiones objetivas. La metodología del MA permite, luego de una

revisión crítica de la información disponible, combinar por métodos estadísticos formales los resultados de distintos estudios realizados con objetivos similares o comparables. De este modo, se puede arribar a conclusiones o recomendaciones aun cuando los estudios individuales no hayan podido aportar resultados concluyentes. La combinación de los resultados de muchos estudios o ensayos individuales, aumentan el tamaño de la muestra y por lo tanto aumenta la potencia estadística de los MAs. Esto es particularmente importante cuando las diferencias observadas son pequeñas y/o la variabilidad es grande.

El MA vino a reemplazar la revisión crítica descriptiva de los resultados como método para analizar la evidencia. En la revisión crítica el autor analiza los resultados publicados referidos a un determinado tema. Al no haber reglas o procedimientos formales, el autor hace recomendaciones o saca conclusiones subjetivas, es proclive al sesgo y al error. El MA dotó de rigor al proceso de búsqueda, selección, análisis e integración estructurada de la evidencia, brindando así una visión más objetiva de la misma.

Caracterización de los estudios involucrados

Se realizó una revisión sistemática a partir de dos fuentes de información: a) trabajos de investigación publicados y disponibles online y; b) trabajos de investigación no publicados, disponibles a través del contacto con sus autores, investigadores de organismos de ciencia y tecnología (INTA, Universidades, etc.). La búsqueda de trabajos publicados se realizó a través de Google Académico, utilizando las palabras: fertilización + pasturas cultivadas. Se seleccionaron ensayos en condiciones de producción comercial y de estaciones experimentales, que informaran, al menos, producción de materia seca (kg MS/ha) del tratamiento y el testigo, dosis de nitrógeno (kg N/ha) y fecha de fertilización. La búsqueda de trabajos no publicados o publicados, pero no disponibles en la web, se realizó mediante contactos personales con referentes.

Se obtuvo una base de 404 datos, correspondientes a 98 ensayos de fertilización nitrogenada, realizados entre 1995 y 2021, en 18 localidades de la Región Pampeana (Figura 1a, Tabla A1). El 92 % de los ensayos correspondió a informantes calificados y el 8 % restante a datos publicados. El 52 % de los ensayos se realizó en suelos Vertisoles y el 48 % restante en suelos Molisoles. Las pasturas anuales invernales puras (PI) fueron el principal tipo de recurso forrajero evaluado (78 %), pasturas perennes consociadas (PP) (17 %) y pasturas invernales anuales con leguminosas (PI+leg) (5 %) (Figura 1b, Tabla A1).

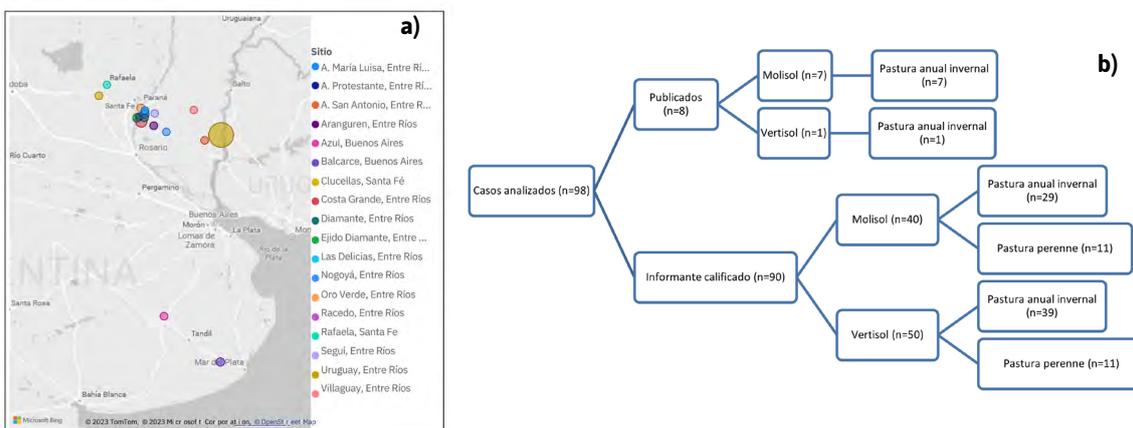


Figura 1. a) Ubicación de los sitios de los experimentos de fertilización nitrogenada incluidos en el análisis (el tamaño de los círculos indica el número relativo de casos por cada sitio); b) distribución de los experimentos de fertilización nitrogenada incluidos en el análisis, en función de la fuente de datos, tipo de suelo y tipo de pastura.

Análisis estadístico de los datos

Sobre esta base de datos compilada, se realizaron distintos análisis estadísticos con el mismo objetivo principal del trabajo.

Análisis de varianza, test de medias y regresión

Las fuentes de variación analizadas fueron el “Tipo de pastura”, el “Tipo de Suelo”, la “Dosis de N media” que se estableció haciendo rangos según la tabla 1 y la “Dosis de P media” según la tabla 2. Otras fuentes de variación como el “cultivo antecesor”, la “fecha de fertilización”, el “tipo de pastura”, y otras también fueron consideradas.

Como variable dependiente, se consideró la productividad por tratamiento (kg de materia seca por hectárea) y se calculó la respuesta a N de cada ensayo y la eficiencia de uso del nitrógeno, como otras variables dependientes.

Tabla 1. Rango de dosis N

Orden	Rango N (kg/ha)	Dosis Media N (kg/ha)	Nº Datos
1	0	0	102
2	23-45	32,4	26
3	46-60	47,9	53
4	60-70	64,2	22
5	70-90	76,5	42
6	91-110	95,1	47
7	120-140	131	35
8	150-180	151,5	50
9	>180	226,4	20

Tabla 2. Rango de dosis P

Orden	Rango P (kg/ha)	Dosis Media P (kg/ha)	Nº Datos
1	0	0	53
2	10-12	10,5	12
3	16	16	13
4	20	20	171
5	30	30	38
6	100	100	8

Estimación de los umbrales de nitrógeno disponible suficiente

Para el cálculo de los umbrales se usó la metodología propuesta por Dyson y Conyers (2013) modificada por Correndo et al. (2017), denominado método del arco seno-logaritmo (ALCC), que ha sido utilizada en Argentina para calibrar niveles críticos de cultivos forrajeros (Pautasso y Barbagelata, 2017; Marino y Echeverría, 2018). El rendimiento relativo (RR) se calculó por ensayo como el cociente entre el rendimiento absoluto de cada tratamiento dividido el mayor valor obtenido en el ensayo. El nitrógeno

disponible (ND) se calculó de 0-20 cm, sumando los kilogramos de nitrógeno derivado del nitrato de suelos informado en cada ensayo más el nitrógeno agregado. En aquellos ensayos donde no se informaba el nivel de nitratos a la siembra, se tomó el valor de nitratos promedio de todos los ensayos. Los valores críticos de ND y agregado de N para rendimiento relativo (%), se obtuvieron mediante: i) ajuste de modelos de respuesta lineal y meseta, con la subrutina Solver del programa Microsoft® Excel y, ii) curva de calibración arco seno logaritmo (ALCC) modificado por Correndo et al. (2017). Para establecer si el rendimiento de pasturas anuales invernales y pasturas perennes consociadas pueden combinarse y representarse mediante una sola función o si deben representarse con dos funciones diferentes, se compararon dos modelos: i) modelo completo, que describe los resultados de los dos sets de datos utilizando dos funciones, una para cada tipo de pastura y, ii) modelo combinado, que describe los resultados con una sola función. La diferencia estadística se probó mediante un test de F (Mead et al., 1993).

Meta-análisis estadístico

El meta-análisis estadístico se elaboró a partir de la diferencia entre el testigo y el tratamiento fertilizado, expresado en kg MS/ha como estimador del efecto de la fertilización o respuesta (Borenstein et al. 2009). Se analizó la Homogeneidad, utilizando los estadísticos Q e I². Q sigue una distribución Chi-cuadrado; si Q excede un valor crítico de una cola con k-1 grados de libertad (donde k es el número de ensayos), la varianza de los efectos de los ensayos es mayor a la esperada y se rechaza la hipótesis nula ($\alpha=0,05$) de homogeneidad de varianza; por lo que se utiliza un modelo de efectos aleatorios para calcular la varianza del meta-análisis. El índice I² representa la proporción de la variación total en el estimador del efecto, que obedece a la heterogeneidad de los ensayos y no al azar. Según Higgins y Thompson (2002), se considera que existe baja heterogeneidad si I²=25%, media heterogeneidad si I²=50% y alta heterogeneidad si I²=75%. Posteriormente al análisis de Homogeneidad, se elaboró un Forest Plot (Lewis & Clarke, 2001, Borenstein, 2009) de la respuesta (kg MS/ha) como el estimador del efecto del fertilizante, para todos los ensayos analizados. Los cálculos para el análisis de Homogeneidad y el Forest Plot se realizaron mediante la planilla Excel desarrollada por Neyeloff et al. (2012).

Árbol de regresión y clasificación

El análisis de árbol de regresión es un método no paramétrico que divide recursivamente los datos en grupos sucesivamente más pequeños con divisiones binarias basadas en una única variable predictiva (Breiman et al., 1984; Clark y Pregibon, 1992). El análisis de árbol de regresión produce un resultado de diagrama de árbol, con ramas determinadas por reglas de división y una serie de nodos terminales que contienen la respuesta media (variable dependiente) y el número de observaciones que caen dentro de cada nodo terminal.

Se utilizó la técnica de árbol de regresión para analizar la influencia de las variables de suelo y manejo (tipo de suelo, nivel de materia orgánica, disponibilidad de fósforo, cultivo antecesor, dosis de nitrógeno) sobre la productividad de Materia Seca (MS) de forraje y la eficiencia de utilización del nitrógeno (MS producida en el periodo de evaluación y respuesta de MS por unidad de N aplicada EUN respectivamente). La base de datos fue de (n=397 para MS/ha y n=253 para EUN), compuesta por las variables analizadas. Se dividió en pequeños grupos, escalados en orden de relevancia para una

única variable predictora del árbol de regresión. Así, se generó un diagrama con ramas determinadas por reglas de división, conectadas por nodos que tienen una respuesta promedio final (productividad o eficiencia) y el número de observaciones. Para ello, el algoritmo genera el máximo número de ramas y posteriormente se ajustó el árbol de regresión mediante validación cruzada (Thermeau y Arkinson, 1997). Se utilizó el software R (R Core Team, 2021) para construir el árbol de regresión.

Para comprender el peso de importancia de los factores de suelo y de manejo, se utilizó el modelo de partición recursiva (algoritmo rpart), utilizado para generar el porcentaje de importancia de las variables analizadas en el árbol de regresión (Kuhn, 2008). Otros estudios han utilizado esta misma metodología para analizar la influencia de aspectos agronómicos en la productividad (Mourtzinis et al., 2018; Ribas et al., 2020; Ribas et al., 2021; Tagliapietra et al., 2021; Rizzo et al., 2023).

Síntesis de resultados y conclusiones

Productividad de materia seca (kg/ha) Estadística clásica descriptiva

Efecto Zona o región y Tipo de suelo

En la provincia de Entre Ríos se registró menor productividad en los ensayos respecto a las otras provincias con datos. Sin embargo, esto no podría atribuirse al tipo de suelos, dado que los Vertisoles que dominan la provincia de Entre Ríos, presentaron significativamente mayor productividad que los molisoles.

Tabla 3. Test de medias para el efecto de la zona de producción.

Zona-Provincia	Productividad (kg/ha)	n	E.E.		
Entre Ríos	4491	323	118	A	
BsAs-SaFe-Cba	5701	74	246		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Fisher - $p > 0,05$)

Tabla 4. Test de medias para el efecto tipo de suelo

Suelo	Productividad (kg/ha)	n	E.E.		
Molisol	4268	196	152	A	
Vertisol	5153	201	150		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Fisher - $p > 0,05$)

El efecto del cultivo antecesor, fue muy significativo (tabla 5). La siembra sobre pasturas, verdes de invierno o campo natural tuvo una productividad superior a las siembras sobre soja o gramíneas de verano. Un número importante de ensayos no especificaron el antecesor.

Esto podría estar relacionado a la posibilidad de preparar con tiempo la cama de siembra y sembrar más temprano.

Tabla 5. Efecto del cultivo Antecesor

Antecesor	Productividad (kg/ha)	n	E.E.			
Gram-Verano	2997	20	450	A		
Soja	3050	41	314	A		
Campo Natural	4509	94	207		B	
Sin Especificar	4796	104	197		B	
Verdeo Invierno	4962	31	361		B	C
Pastura	5710	107	194			C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Fisher - $p > 0,05$)

En relación a lo dicho anteriormente, la fecha de fertilización y siembra, tuvo en efecto marcado sobre la productividad (tabla 6). La fertilización y siembra en los meses de marzo, abril y mayo, mostraron mayor productividad que en los meses de junio y julio. El fraccionamiento de la dosis de nitrógeno en dos o tres aplicaciones, presentó los valores más altos de productividad.

Tabla 6. Efecto de la fecha de fertilización (siembra)

Mes de Fertilización	Productividad (kg/ha)	N	E.E.		
Julio	3189	10	658	A	
Junio	3447	60	269	A	
Abril	4689	149	173		B
Marzo	4990	17	505		B
Mayo	5233	74	242		B
Tres Meses	5293	52	289		B
Abr-May	5230	31	401		B
Abr-Ago	6408	4	1041		B

Tres meses: siembra y fertilización en marzo, abril o mayo y dos refertilizaciones luego. Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Fisher - $p > 0,05$)

La fertilización fraccionada mostró mayor productividad en general (tabla 7), pero sobre todo en Raigrás. Para las otras especies no fue significativo o no hubo datos para comparar (tabla 8). Sin embargo, esto podría estar influenciado en que las dosis de N promedio fraccionadas fueron algo más altas (123 kg/ha) que las no fraccionadas (91 kg/ha).

Tabla 7. Efecto del fraccionamiento de la dosis de nitrógeno.

Fraccionada	Productividad (kg/ha)	n	E.E.		
NO	4547	310	122	A	
SI	5322	87	231		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Fisher - $p > 0,05$)

Tabla 8. Efecto del fraccionamiento de la dosis de nitrógeno. Sólo Raigrás

Fraccionada	Productividad (kg/ha)	n	E.E.		
NO	4388	111	181	A	
SI	5772	38	309		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Fisher - $p > 0,05$)

Tipo de pasturas y especies forrajeras

La productividad media de cada “tipo de pastura” no fue significativamente diferente (tabla 9).

Tabla 9. Efecto del tipo de pastura.

Tipo pastura	Productividad (kg/ha)	n	E.E.	
Pasturas anuales invernales	4630	300	125	A
Pasturas perennes consociadas	4983	97	220	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Fisher - $p > 0,05$)

Se observó una diferencia significativa entre las especies dominantes de las pasturas (Tabla 10). Las pasturas de Lotus, con muy pocos datos, mostraron una productividad muy baja. La productividad media de la avena, el trigo el triticale, el raigrás, la alfalfa consociada y la cebadilla fue de 4181 a 5135 kg/ha, sin diferencias significativas. Se destacaron algunos reportes de Raigrás con leguminosas con una media de 6349 kg/ha.

Tabla 10. Efecto de la especie forrajera cultivada.

Especie	Productividad (kg/ha)	n	E.E.			
Lotus+Gram	3047	6	870	A		
Avena	4181	103	210	A	B	
Trigo/Triticale	4656	19	489	A	B	
Raigras	4741	149	175	A	B	
Alfalfa+Gramin	5111	91	223		B	C
Cebadilla	5135	17	517		B	C
Raigas+Legum	6349	12	615			C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Fisher - $p > 0,05$)

Efecto de la fertilización

El efecto de la dosis media de P fue significativo, aunque poco consistente (Tabla 11). En los ensayos con alto nivel de P en el suelo, donde no se fertilizó con P, se obtuvo un rendimiento similar o superior a sitios con dosis de 10 a 30 kg de P por ha. Esto hace pensar que el fósforo no fue una limitante de estos ensayos. Sin embargo, 10 casos con dosis muy alta de P mostraron la mayor productividad. La productividad más baja se obtuvo con 10 y 30 kg de P por ha.

Tabla 11. Efecto de la dosis media de fósforo.

Dosis de P media (kg/ha)	Productividad (kg/ha)	n	E.E.			
0	5642	72	231		B	
10	3566	16	446	A		
16	5312	19	412		B	
20	4392	223	145	A		
30	5605	57	241		B	
100	7217	10	561			C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Fisher - $p > 0,05$)

El efecto de la dosis media de nitrógeno aplicada fue muy significativo, con una respuesta media de 16 kg de materia seca por kg de N aplicado en las Pasturas Anuales Invernales o Verdeos de Invierno. En las Pasturas consociadas plurianuales no hubo ajuste (Figura 2).

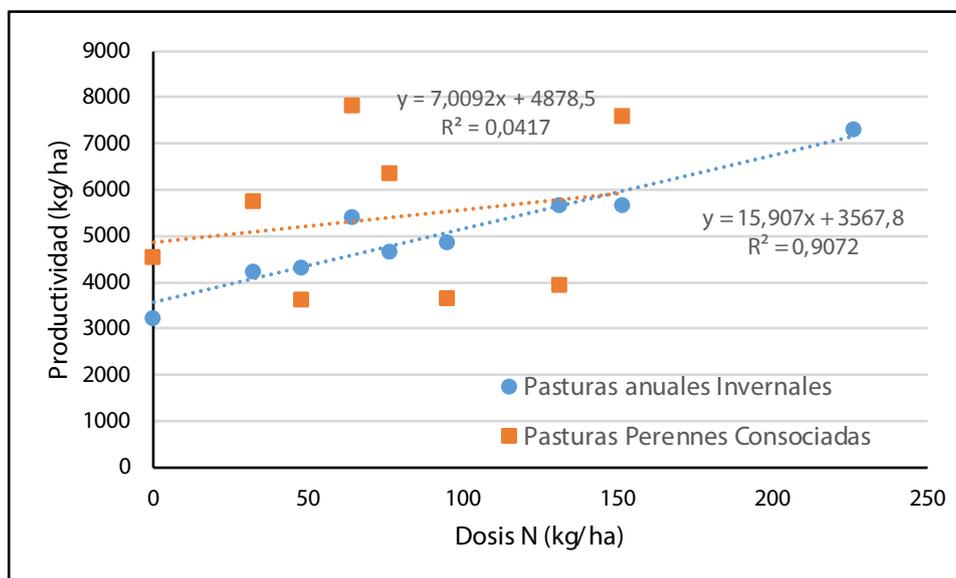


Figura 2. Relación entre la dosis de nitrógeno aplicada y la productividad media para cada rango de dosis en diferentes tipos de pasturas.

Sin embargo, hay que ver bien que lo que no respondió al N fueron la Pasturas consociadas con Lotus y que las consociadas con Alfalfa respondieron muy bien con 18.8 kg de materia seca por kg de N aplicado, posiblemente por la poca producción del Lotus en la época invernal comparativamente con las alfalfas con baja latencia. (Figura 3).

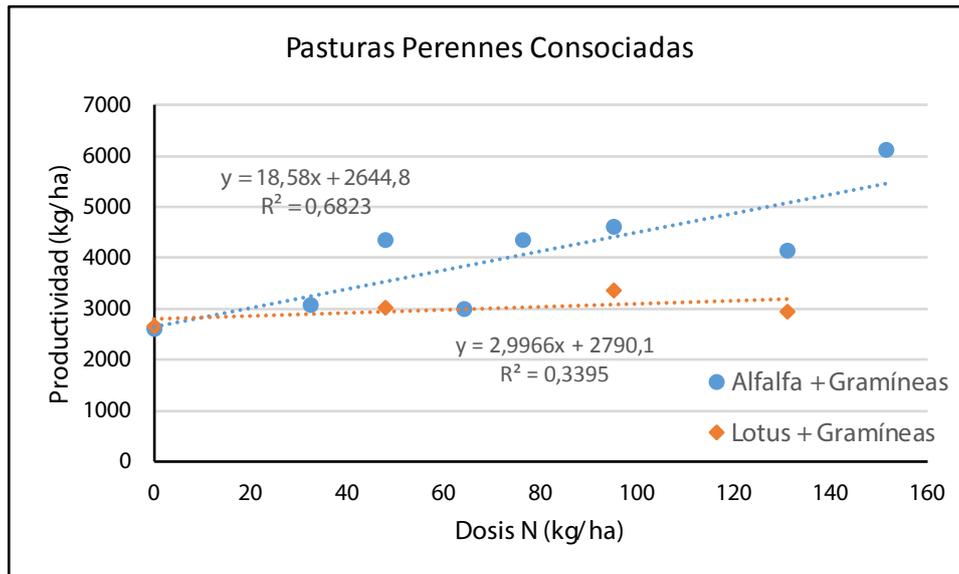


Figura 3. Relación entre la dosis de nitrógeno aplicada y la productividad media para cada rango de dosis en diferentes tipos de pasturas perennes.

Dentro de las pasturas anuales invernales, que se disponen de más ensayos y datos (Raigrás, Avena, Cebadilla), respondieron muy bien. Raigrás con leguminosa, hay un ensayo de muy alta productividad y otro normal, por lo cual no se presentan los datos en la figura. Los ensayos de trigo/triticale mostraron menor respuesta y buen ajuste (Figura 4).

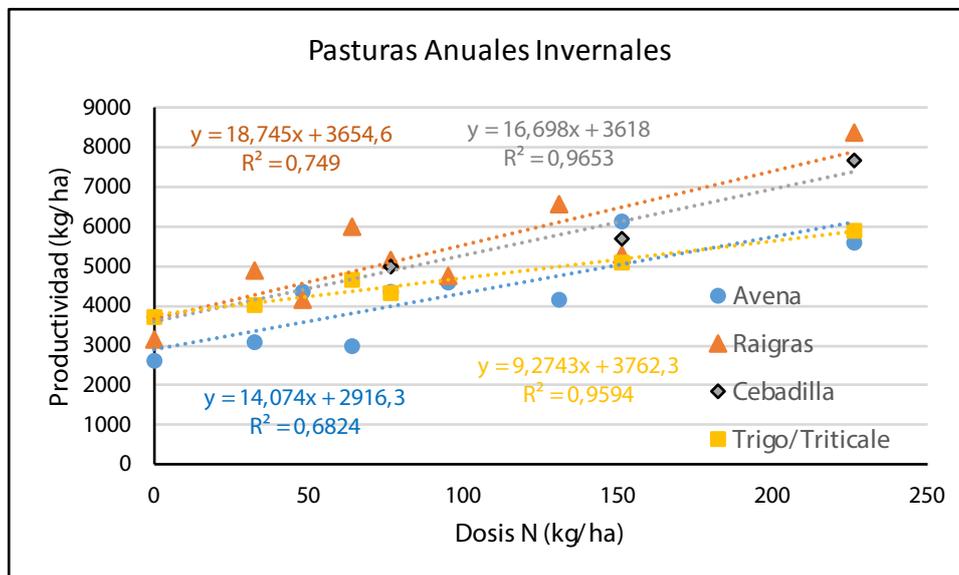


Figura 4. Relación entre la dosis de nitrógeno aplicada y la productividad media para cada rango de dosis en diferentes especies de pasturas anuales invernales.

Análisis de la Respuesta a la fertilización con N

La respuesta a N fue diferente entre regiones. Con una respuesta significativamente superior en las provincias de Santa Fe, Córdoba y Buenos Aires respecto a Entre Ríos (Tabla 12).

Los suelos vertisoles mostraron una significativa menor respuesta respecto a los molisoles (Tabla 13). El antecesor no tuvo efecto sobre la respuesta a N (Tabla 14).

Tabla 12. Efecto de la zona o provincia sobre la respuesta a N.

Zona-Provincia	Respuesta a N (Kg/ha)	n	E.E.		
Entre Ríos	1470	231	73	A	
BsAs-SaFe-Cba	2338	64	129		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Fisher - $p > 0,05$)

Tabla 13. Efecto del tipo de suelo sobre la respuesta a N.

Suelo	Respuesta a N (Kg/ha)	N	E.E.		
Vertisol	1441	140	96	A	
Molisol	1791	155	84		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Fisher - $p > 0,05$)

Tabla 14. Efecto del tipo del cultivo antecesor sobre la respuesta a N.

Antecesor	Respuesta a N (Kg/ha)	n	E.E.	
Soja	1503	31	177	A
Pastura	1524	75	126	A
Verdeo-Invierno	1534	23	205	A
Campo Natural	1573	66	129	A
Gramínea-Verano	1778	14	256	A
Sin Especificar	1862	86	120	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Fisher - $p > 0,05$)

La respuesta a la fertilización con N fue significativamente superior en los verdeos de invierno, respecto a las pasturas perennes (Tabla 15).

Tabla 15. Efecto de la especie forrajera cultivada sobre la respuesta a N.

Especie	Respuesta a N (kg/ha)	N	E.E.			
Lotus+Gramínea	476	5	424,93	A		
Alfalfa+Gramínea	883	69	120,1	A		
Trigo/Triticale	1002	14	299,26	A	B	
Raigrás+Leguminosa	1707	7	360,32		B	C
Raigrás	1757	110	103,36			C
Avena	1898	78	116,11			C
Cebadilla	2096	12	274,29			C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Fisher - $p > 0,05$)

La respuesta a N con distintas dosis de P No mostró diferencias entre 0 y 100 kg/ha de P (Tabla 16). Esto sostiene también la falta de interacción NxP de estos datos.

Tabla 16. Efecto de la dosis media de fósforo sobre la respuesta a N.

P media	Respuesta a N (Kg/ha)	n	E.E.		
0	1563	53	145		B
10	1391	12	254		B
16	1590	13	248		B
20	1488	171	84		B
30	797	38	148	A	
100	1648	8	310		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Fisher - $p > 0,05$)

La fecha de fertilización tuvo un efecto significativo sobre la respuesta (Tabla 17). Diferente a lo que se observó en productividad (Tabla 6). Aunque las dosis fraccionadas dieron más respuesta también (Tabla 18).

Tabla 17. Efecto mes de fertilización sobre la respuesta a N.

Mes de Fertilización	Respuesta a N (Kg/ha)	n	E.E.			
Julio	1133	7	360	A		
Mayo	1445	52	154	A		
Abril	1637	113	106	A		
Marzo	1648	13	274	A	B	
Abr-May	1450	23	233	A	B	
Junio	1677	44	150	A	B	
3 Meses	1930	39	159		B	
Abr-Ago	3913	4	475			C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Fisher - $p > 0,05$)

Tabla 18. Efecto del fraccionamiento de la dosis sobre la respuesta a N.

Fraccionada	Respuesta a N (Kg/ha)	n	E.E.		
NO	1543	229	74	A	
SI	2056	66	127		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Fisher - $p > 0,05$)

Eficiencia de uso del Nitrógeno (EUN)

Como era de esperar, para todos los datos disponibles, la EUN fue más alta a dosis más bajas de N. Con dosis de 30 a 60 kg de N/ha se observó una eficiencia media de 25-30 kg/kg. Dosis de 100 kg/ha de N o más, mostraron eficiencias de 10 a 15 kg/kg (Figura 5).

Si bien las dosis divididas o fraccionadas mostraron mayor biomasa y respuesta, no hubo diferencias en la EUN con la dosis no fraccionada.

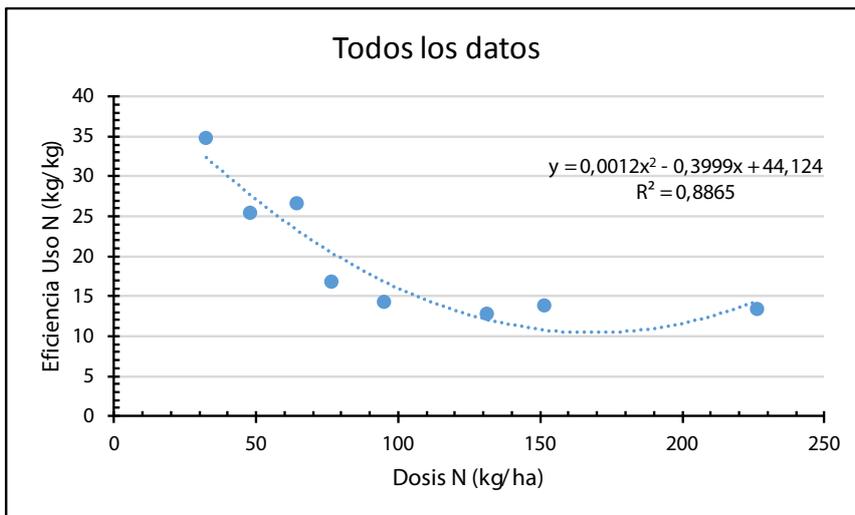


Figura 5. Relación entre la dosis media de nitrógeno y la eficiencia de uso del nitrógeno para todos los datos disponibles, sin discriminar por tipos o especies de pasturas.

Entre Ríos presentó menor EUN y los suelos vertisoles menor EUN que los Molisoles (Tabla 19 y 20 – Figura 6).

Tabla 19. Efecto de la zona o provincia sobre la Eficiencia de Uso del Nitrógeno

Zona Provincia	EUN	n	E.E.		
Entre Ríos	19,2	231	0,90	A	
BsAs-SaFe-Cba	26,7	64	1,59		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Fisher - p > 0,05)

Tabla 20. Efecto del tipo de suelo sobre la Eficiencia de Uso del Nitrógeno

Suelo	EUN	n	E.E.		
Vertisol	18,7	140	1,19	A	
Molisol	22,3	155	1,03		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Fisher - p > 0,05)

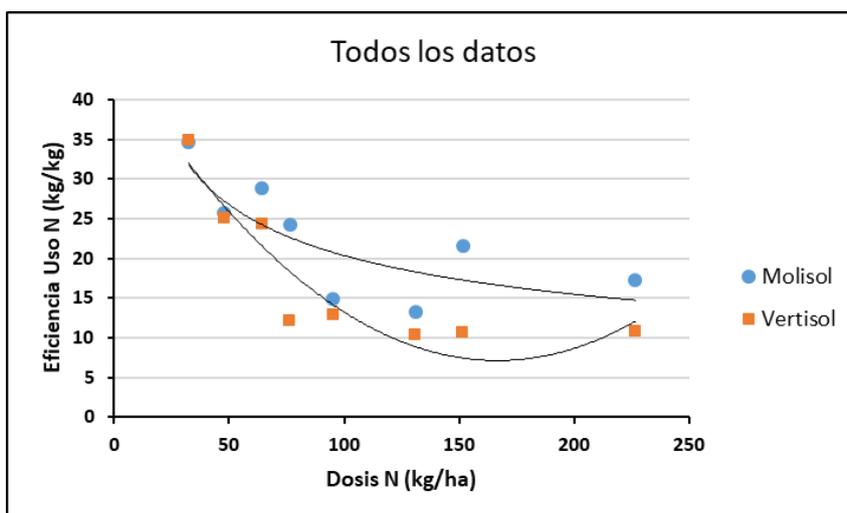


Figura 6. Relación entre la dosis media de nitrógeno y la eficiencia de uso del nitrógeno para todos los datos disponibles, discriminado solamente por tipos de suelo.

Estos resultados para todos los datos, mostraron también, baja eficiencia de uso del N en Pasturas perennes polifíticas (Tabla 21). El efecto de las “especies” tuvieron marcada y significativa diferencia en la EUN (Tabla 22).

Tabla 21. Efecto del tipo de pastura sobre la Eficiencia de Uso del Nitrógeno

Tipo pastura	EUN	n	E.E.		
Pastura Perenne	11,88	74	1,45	A	
Pastura Invernal Anual	22,36	221	0,89		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Fisher - $p > 0,05$)

Tabla 22. Efecto de la especie forrajera cultivada sobre la Eficiencia de Uso del Nitrógeno

Especie	EUN	n	E.E.		
Lotus + Gramínea	5,58	5	5,25	A	
Trigo/Triticale	10,59	14	3,69	A	
Alfalfa + Gramínea	12,78	69	1,48	A	
Cebadilla	15,52	12	3,39	A	
Avena	22,69	78	1,41		B
Raigrás	23,19	110	1,28		B
Raigrás+Leguminosa	27,55	7	4,45		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Fisher - $p > 0,05$)

La figura 7 muestra la variación en la EUN para cada especie en las diferentes dosis de N ensayadas. El Raigrás y la Avena mostraron los valores más altos de EUN a lo largo de todas las dosis de N.

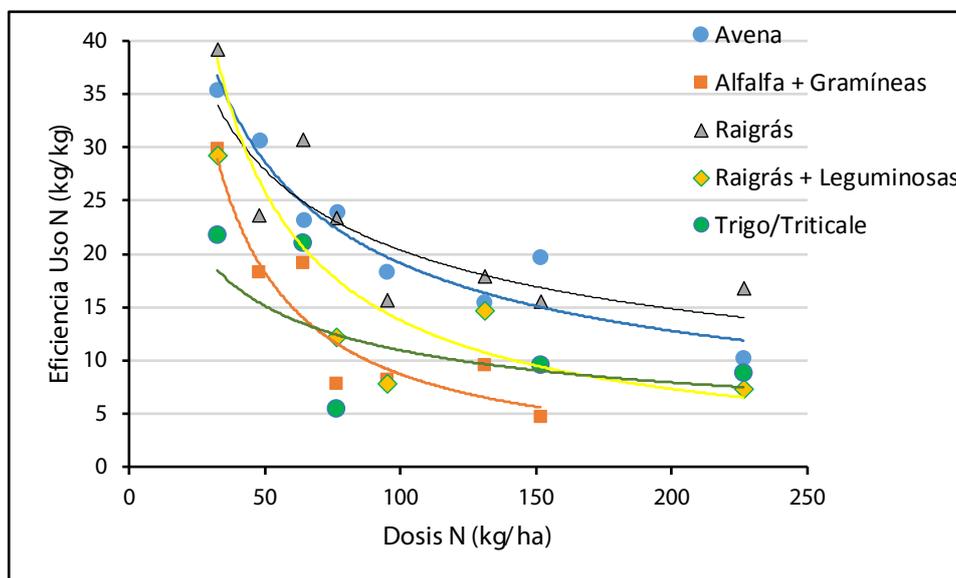


Figura 7. Relación entre la dosis media de nitrógeno y la eficiencia de uso del nitrógeno para todos los datos disponibles, discriminado solamente por especies forrajeras.

Meta-análisis estadístico

Para ponderar el meta-análisis, se evaluó la homogeneidad de los ensayos, agrupados en cuatro niveles de fertilización (N1= 23-41 kg N/ha; N2= 45-83 kg N/ha, N3=

84-120 kg N/ha y N4= 123-300 kg N/ha) y dos tipos de pasturas; PP: pasturas perennes y Pasturas anuales (PI y PI+leg; las dos últimas se consideran como un mismo tipo) denominado VI: Verdes de Invierno, en el análisis; utilizando un modelo de efectos aleatorios (Tabla 23). En el menor nivel de fertilización (N1), para PP y VI, los ensayos tuvieron homogeneidad de varianza ($p < 0,05$) y baja heterogeneidad, cuantificada mediante el índice I2. En el nivel N2 se observó alta heterogeneidad entre ensayos, independientemente del tipo de pastura. En N3 y N4, sólo en VI, se aceptó la hipótesis de homogeneidad de varianza entre los ensayos.

Tabla 23. Valores del meta-análisis para las fuentes de variación consideradas

Nivel de N	Tipo pastura	Q	I2 (%)	gl	Efecto medio (kg MS/ha)	e.e.	IC (kg MS/ha)
N1 (23-41 kg/ha)	PP	6,13*	2,2	6	905	42,2	823-988
	VI	32,3**	47,4	17	1108	26,7	1056-1160
N2 (45-83 kg/ha)	PP	448	95,7	21	929	10,1	909-948
	VI	820	88,9	91	1468	11,8	1444-1491
N3 (84-120 kg/ha)	PP	742	97,8	16	1039	10,9	1017-1060
	VI	48*	10	43	1626	40,5	1547-1706
N4 (123-300 kg/ha)	PP	1262	98,5	19	953	9,4	953-971
	VI	51*	42	72	2435	57	2435-2547

*Se acepta la Hipótesis de Homogeneidad de los ensayos ($p < 0,05$); ** Se acepta la Hipótesis de Homogeneidad de los ensayos ($p < 0,01$); gl: grados de libertad; e.e.: error estándar; IC: intervalo de confianza

Se elaboró un Forest Plot (Figura 8), con la respuesta al nitrógeno (kg MS/ha) de los ensayos para cada nivel de fertilización. Cada ensayo es representado por un punto, con un intervalo de confianza (líneas verticales) del 95%, donde los ensayos más precisos (con menor intervalo) tienen mayor peso relativo en el meta-análisis.

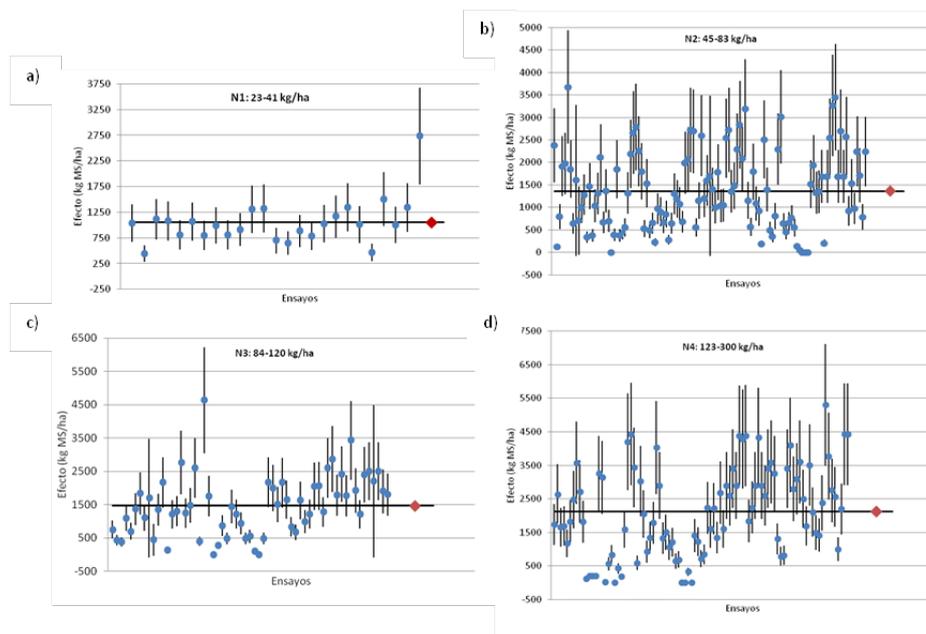


Figura 8. Forest-Plot de los ensayos de fertilización nitrogenada, a) N1; b) N2; c) N3; d) N4. Las barras verticales indican el intervalo de confianza del 95% para cada ensayo. El rombo de color rojo sobre la línea vertical indica el valor medio del meta-análisis para cada grupo de ensayos.

Los verdes de invierno presentaron más homogeneidad o claridad en la respuesta a nitrógeno en niveles bajos o altos de N aplicado (N1, N3 y N4). Las Pasturas Perennes, solamente a niveles bajos de N aplicado (N1) mostraron estabilidad y baja variabilidad en la respuesta a N.

Este meta-análisis estadístico, realizado para 4 niveles de nitrógeno aplicado y los dos tipos de pasturas, indica que es probable que otras fuentes de variación, tales como el tipo de suelo, el cultivo antecesor y el volumen de lluvias durante el período de evaluación, determinen la heterogeneidad en los grupos evaluados.

Respuesta a la fertilización

Se determinó umbral de nitrógeno disponible (ND: suelo +fertilizante) para rendimiento relativo (RR) del 90 % para pasturas perennes consociadas y pasturas anuales invernales (Figura 9), y se constató una diferencia estadística entre los sets de datos evaluados (Tabla 24)

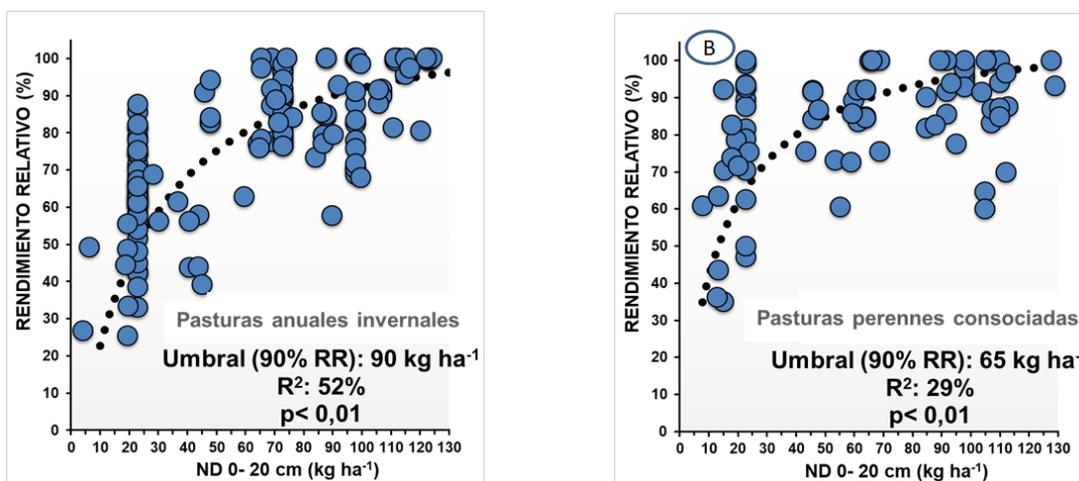


Figura 9. RR en función del ND (0-20 cm). A) Pasturas anuales invernales; B) Pasturas perennes consociadas.

Tabla 24. Análisis de la variación del error entre el modelo completo y el combinado, y de la significancia de la diferencia entre los dos modelos.

	SCE	GL	CME	Valor F	Valor p
Pasturas anuales invernales	111	286	0.39		
Pasturas perennes consociadas	69	107	0.64		
Modelo Completo (dos modelos)	179	393	0.46		
Modelo Combinado (un modelo)	184	395	0.47		
Diferencia entre Modelos	4.46	2	2.23	4.89	0.01

De igual manera, para definir el umbral de N agregado para un RR del 90 %, se compararon los dos modelos lineal plató para ambos sets de datos (Figura 10), y se encontraron diferencias significativas entre los grupos (Tabla 25).

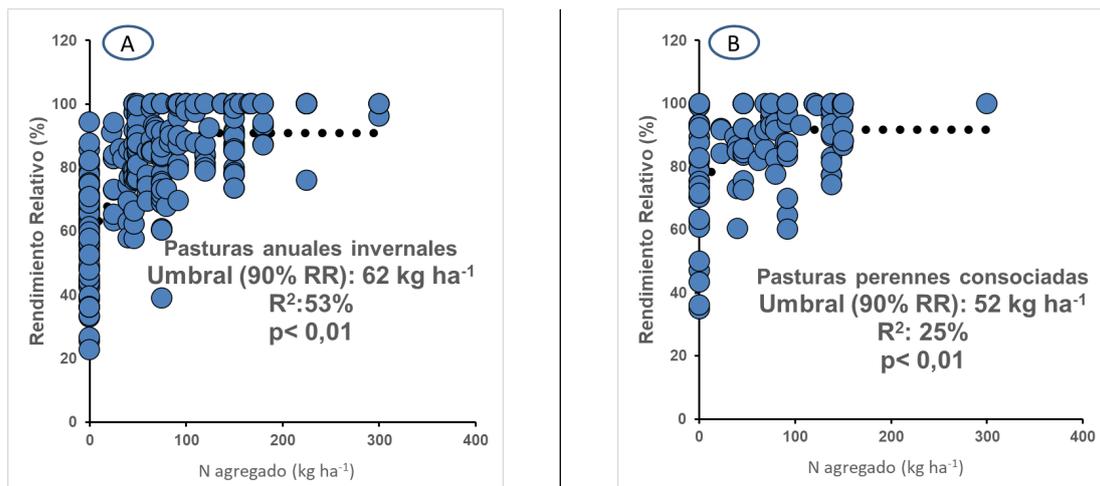


Figura 10: RR de MS en función del N agregado. Pasturas anuales invernales; B) Pasturas perennes consociadas

Tabla 25: Análisis de la variación del error entre el modelo completo y el combinado, y de la significancia de la diferencia entre los dos modelos.

	SCE	GL	CME	Valor F	Valor p
Pasturas anuales invernales	4.6	284	0.016		
Pasturas perennes consociadas	1.7	105	0.017		
Modelo Completo (dos modelos)	6.4	389	0.016		
Modelo Combinado (un modelo)	7.0	393	0.018		
Diferencia entre Modelos	0.61	4	0.15	9.26	< 0,01

Con ambas metodologías el umbral fue significativamente menor en pasturas perennes consociadas que en pasturas anuales invernales, lo que significa que los requerimientos de N son menores. Esto podría deberse a la fijación biológica y transferencia de N desde las leguminosas a las gramíneas, en el caso de las pasturas perennes (Thilakarathna et al., 2016; Pautasso et al. 2022).

Arboles de regresión y clasificación estadística

Este análisis estadístico permitió valorar, jerarquizar y clasificar el efecto de otras variables diferentes a la dosis de nitrógeno sobre la productividad de forraje en los ensayos analizados.

La productividad anual de forraje varió ampliamente desde 2333 a 7405 kg/ha en función de las jerarquías y grupos clasificados. La tabla 26 muestra el porcentaje de importancia de las diferentes variables, determinado por este análisis para configurar las ramas del árbol.

Tabla 26: Porcentaje de importancia de las variables sobre la Productividad (MS/Ha)

MO	Dosis. N	Antecesor	Especie	P. Bray	Dosis. P	pH	Dosis. S	Suelo
21	21	20	12	9	8	6	2	1

En la figura 11 de Productividad de Biomasa (Kg MS/ha) se observa principalmente una clara y primaria segmentación según los Cultivos Antecesores (20 % de Importancia Tabla 26).

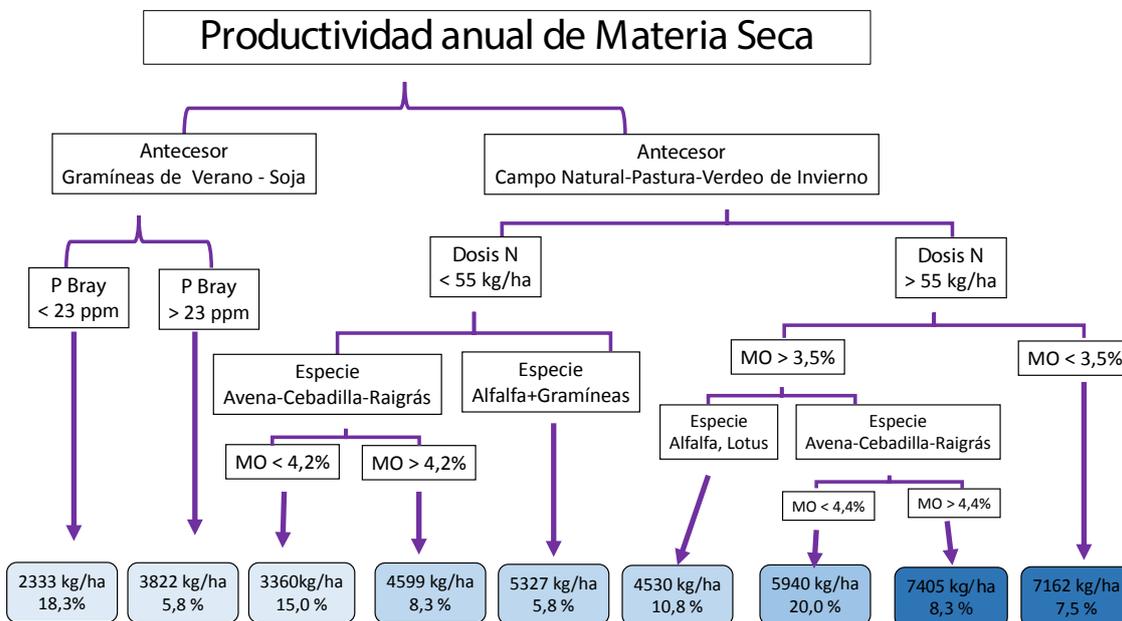


Figura 11. Árbol de regresión que muestra fuentes de variación en el rendimiento de materia seca de las pasturas. Los valores dentro de cada nodo indican la productividad promedio y el porcentaje de observaciones en cada nodo terminal.

I - Los Cultivos de Verano, como antecesores, condicionan a realizar un barbecho corto y una siembra tardía del cultivo forrajero otoñal; generan un menor rendimiento sin importar el nivel de N aplicado, ni la especie sembrada, ni el nivel de MO del suelo. La productividad media fue de 2693 kg/ha. Dentro de este grupo, sólo aparece en segundo orden el nivel de P en el suelo como un factor diferencial (9 % de Importancia Tabla 26). Entonces cuando el antecesor es un Cultivo de Verano lo que define el rendimiento de las pasturas es el nivel de P disponible, sin importar el cultivo forrajero, ni el nivel de MO, ni la dosis de N aplicada. Con 2333 kg/ha y 18,3 % de los datos; y 3822 kg/ha con el 5,8 % de los datos, para niveles menores y mayores a 23 ppm de P respectivamente.

II - En contraste, los Cultivos Antecesores como Pastura, Campo Natural y Verdeo de Invierno (donde se presume que permiten barbecho largo y siembra temprana del cultivo otoñal) estimulan la mineralización de la MO y mejores condiciones de suelo y ambiente para la siembra. Se alcanza una media de 5316 kg/ha de productividad. Con un antecesor que mostró mayor productividad, se encontraron diferencias según el Nivel de N aplicado con valores de 4107 kg/ha con menos y 6071 kg/ha con más de 55 kg/ha de N aplicado (21 % de Importancia Tabla 26).

Los antecesores que permiten un barbecho largo y siembra temprana de los cultivos forrajeros en otoño, se sub dividieron según la dosis de N aplicado en:

1 - **N < 55 kg/ha:** con productividades entre 3360 y 5327 kg/ha según las especies forrajeras utilizadas (12 % de Importancia Tabla 32) y una media de 4107 kg/ha:

A – “Pastos” (Avena-Cebadilla-Raigrás): con una media de 3803 kg/ha y diferentes productividades según el nivel de MO del Suelo (21 % de Importancia Tabla 26):

< 4,2 %: 3.360 kg/ha (15 % de los datos)

> 4,2 %: 4.599 kg/ha (8,3 % de los datos)

B- Pasturas consociadas de Alfalfa con Gramíneas con 5327 kg/ha y 5.8 % de los datos.

2 – **N >55 Kg/Ha**: con una productividad media de 6071 kg/ha y subdividido según los niveles de Materia Orgánica de los suelos (21 % de Importancia Tabla 32) y las especies forrajeras utilizadas (12 % de Importancia Tabla 26):

A – MO > 3,5 %: una media de 5862 kg/ha, con diferentes productividades según las especies forrajeras utilizadas:

A1- Leguminosas y Cereales (Alfalfa-Lotus-Trigo-Triticale): 4.530 kg/ha (10,8 % de los datos).

A2- Pastos (Avena-Cebadilla-Raigrás): con productividad de 6371 kg/ha segmentados nuevamente según los niveles de MO de los suelos:

A2.1- MO < 4,4 %: 5.940 kg/ha (20 % de los datos)

A2.2- MO > 4,4 %: 7.405 kg/ha (máximo nivel de productividad con 8,3 % de los datos)

B – MO < 3,5 %: 7.162 Kg.MS/Ha (7,5 % de los datos) aparentemente sin importar otras variables de suelo ni cultivos forrajeros utilizados.

Dentro del conjunto con cultivos antecesores que permiten una barbecho largo y siembra temprana, se pueden discriminar dos subconjuntos: con Bajo y Alto nivel de N aplicado (55 Kg.N/Ha). Con mayores dosis de N, aparece en primer término una separación entre el nivel de MO (superior a 3,5 %), donde los cultivos con menor rinde son las pasturas consociadas y los cereales de invierno (trigo y triticale). En cambio, los “pastos” tienen mayor productividad, pero se dividen según dos niveles de MO, por encima y por debajo de 4,4 % de MO.

La MO resume, en alguna medida, la fertilidad físico-química del suelo. Posiblemente por ello, la máxima productividad forrajera se alcanzó en suelos con más de 4,4 % de MO. Cultivados con especies de alta productividad (avena-cebadilla-raigrás), fertilizados con más de 55 kg/ha de N y sembrados sobre antecesores de campo natural, pasturas o verdes de invierno. Por otro lado, en condiciones similares, las leguminosas (alfalfa-lotus) mostraron una productividad inferior.

En condiciones de menor fertilización nitrogenada (< 55 kg/ha), la productividad fue mayor en pasturas consociadas de alfalfa con gramíneas. Posiblemente esto debido al aporte de nitrógeno por fijación biológica de las leguminosas. Nuevamente la MO del suelo más alta estuvo asociada a mayor productividad de las gramíneas puras.

En síntesis, los “pastos” son los más exigentes en fertilidad de suelo, requieren en orden de importancia: Barbecho Largo, Siembra Temprana, Buenos Suelos y Alta dosis de N aplicado para expresar su potencial de rendimiento.

Eficiencia e Uso de Nitrógeno (EUN)

Un aspecto diferente es la Eficiencia de Uso de Nitrógeno (EUN), que representa la respuesta o incremento en productividad, por cada quilogramo de N aplicado (kg MS/kg N). La figura 12 muestra el resultado del análisis estadístico de árboles de clasificación para la variable EUN y la tabla 27 el factor de importancia de cada variable.

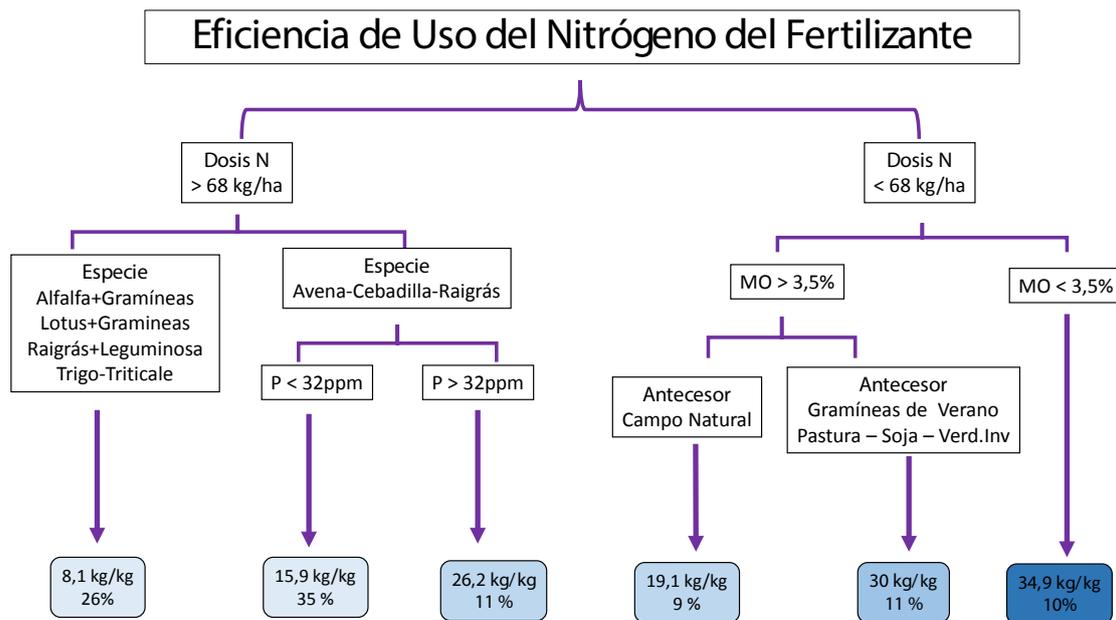


Figura 12. Árbol de clasificación para el conjunto de datos disponibles de Eficiencia de Uso del Nitrógeno del Fertilizante. Los valores dentro de cada nodo indican la EUN promedio y el porcentaje de observaciones en cada nodo terminal.

Tabla 27. Porcentaje de importancia de las variables consideradas sobre la EUN

Dosis. N	Especie	MO	P. Bray	pH	Antecesor	Suelo	Dosis. P	Dosis. S
32	18	13	13	8	7	4	3	1

En la figura 12 se observa principalmente una clara segmentación según los Niveles de Nitrógeno aplicados (32 % de Importancia Tabla 27).

I - Las mayores Dosis de Nitrógeno (> 68 kg N/ha) generaron los menores niveles de Eficiencia en el Uso del Nitrógeno (media de 14,6 kg MS/kg N), segmentándose según tipo de cultivos forrajeros (18 % de Importancia Tabla N° 2). Las pasturas consociadas con leguminosas tuvieron el menor nivel de eficiencia (8,1 kg MS/kg N) y los “Pastos” (Avena-Cebadilla-Raigrás) con superiores niveles de eficiencia (18,3 kg/kg) subdividido según el nivel de P disponible 14,9 y 26,2 kg/kg para niveles de P disponible menores y mayores a 32 ppm respectivamente (13 % de Importancia Tabla 27).

II - En contraste, con menores dosis de nitrógeno utilizadas se observó un mayor rango de Eficiencia en el Uso del Nitrógeno (desde 19,1 hasta 34,9 kg/kg) con una media de 28.3 kg/kg, segmentándose según el nivel de MO del suelo (13 % de Importancia Tabla 27).

En los casos con dosis de N menores a 68 kg/ha, los mayores niveles de MO (>3,5%) mostraron menor EUN (25,1 kg/kg), variando según los Cultivos Antecesores de 19,1 kg/kg, sobre campos naturales, normalmente de mayor fertilidad nitrogenada; hasta 30 kg/kg, sobre otros antecesores (pero sólo con un 7 % de Importancia Tabla 33). El máximo nivel de eficiencia observado fue 34,9 kg/Kg y se presentó en los suelos con menores niveles de MO (<3,5%).

En síntesis, es evidente que siempre se obtienen mayores niveles de eficiencia de uso del nitrógeno con menores dosis aplicadas, las gramíneas siempre convierten el nitrógeno con mayor eficiencia que las leguminosas. También se encontró una relación

entre el nivel de P Bray y la eficiencia en el uso de nitrógeno cuando se usa mayores dosis de N en cultivos de gramíneas forrajeras. Es lógico que, a menores niveles de nitrógeno aplicado, el nivel de materia orgánica del suelo afecte en forma inversamente proporcional la eficiencia en el uso del nitrógeno.

Esta técnica estadística permitió separar grupos o conjuntos de situaciones que determinan o explican parte de la compleja variabilidad observada en la producción de materia seca total y la respuesta al nitrógeno aplicado.

Claramente la mayor productividad de forraje se pudo alcanzar en condiciones de siembras tempranas, lo que fue posible con antecesores que desocupen el terreno para su preparación en verano. En esta situación con dosis de N superiores a 55 kg/ha, en suelos fértiles ricos en materia orgánica y fósforo disponible, sembrados con avena, cebadilla o raigrás, fue posible alcanzar la máxima productividad forrajera. En estas condiciones también se alcanzó una alta eficiencia del uso del Nitrógeno (EUN) del fertilizante aplicado, que fue de 30 kg de materia seca por kg de N, disminuyendo levemente a 26 kg/kg, con dosis mayores a 68 kg/ha de N.

En contraposición, la siembra de forrajeras sobre antecesores de cultivos de verano determina de por sí una productividad baja (menor a 4000 kg/ha). La fertilización nitrogenada de pasturas mixtas (leguminosas y gramíneas) o gramíneas puras sobre suelos pobres en P poco fértiles y dosis mayores a 68 kg/ha de N, mostró baja EUN (<16 kg/kg).

Discusión y conclusiones

En Argentina existe información publicada y no publicada sobre productividad y respuesta de la producción de forraje a la aplicación de nitrógeno en pasturas y verdesos. Si bien no se puede decir que es la información es abundante, si se podría decir que es suficiente como para valorar los efectos principales y tomar mejores decisiones.

La principal limitante con la que se trabajó fue la cantidad de datos obtenidos (n=404) ya que, al haber muchos factores involucrados en la respuesta esperada a la fertilización nitrogenada de pasturas cultivadas, algunas hipótesis de trabajo no pudieron ser confirmadas por la poca cantidad de datos utilizados. También la falta de información complementaria como por ejemplo la fecha en la que se suprimió el cultivo antecesor que determina la duración del barbecho; como así también la duración y los trabajos de preparación del suelo durante el mismo, que condicionan la confirmación de las hipótesis vinculadas a la importancia de los cultivos antecesores. Además, la poca información climática registrada durante el barbecho y durante el periodo de implantación y utilización del cultivo forrajero también limitó la validación de las hipótesis específicas.

Primeramente, es oportuno aclarar que un aspecto importante es la productividad o la cantidad total de forraje producido y otra cosa en la respuesta al nitrógeno. En el primer caso representa la cantidad total de forraje para transformar luego en carne o leche y en el segundo caso la respuesta permite evaluar la conveniencia o la rentabilidad de la inversión en fertilizante.

Considerando la productividad, en función de la información disponible y haciendo una primera gran generalización, se puede decir que la productividad total de materia seca en el ciclo de producción otoño-invierno-primaveral de un año, fue similar entre pasturas anuales invernales y pasturas perennes consociadas, en torno a los 4600-4900 kg/ha. Sin embargo, existieron diferencias muy importantes en productividad debido a la región o zona, determinadas en gran parte por la fertilidad y tipo de suelo.

El cultivo antecesor afectó significativamente la productividad. Las pasturas sembradas sobre cultivos de verano, como antecesores, tuvieron menor rendimiento de forraje que las siembras sobre pasturas degradadas, campo natural o los verdeos. Esto puede estar relacionado a una siembra y fertilización más temprana en los meses de marzo a mayo, que también mostró mejor productividad. La fertilización con N afectó significativamente el rendimiento de forraje.

La fertilización con más de 55 kg/ha de N permitió llevar la productividad forrajera en condiciones de siembra temprana, sobre suelos ricos en materia orgánica, en pasturas anuales de avena, cebadilla o raigrás a 7400 kg/ha y en suelos de menos materia orgánica a 7160 kg/ha.

Mientras que, por otro lado, la siembra sobre cultivos de verano determinó que la productividad sea inferior a 4000 kg/ha.

La respuesta a la aplicación de N fue significativamente superior en las pasturas anuales invernales o verdeos de invierno, aportando un volumen de forraje en un momento de escases. Esto determinó una mayor eficiencia de uso del N del fertilizante y la posibilidad de obtener mayor respuesta económica con los verdeos de invierno. Las especies más eficientes en convertir el N del fertilizante en materia seca, fueron el raigrás, la avena y la cebadilla. Se pudo comprobar que las pasturas anuales de invierno tienen requerimientos de nitrógeno superiores a las pasturas perennes consociadas.

También se observó que la respuesta a N fue mayor sobre suelos molisoles que en vertisoles y menor en Entre Ríos que en las otras provincias. Si bien la respuesta a N no fue afectada significativamente por la fertilización con P en estos ensayos, se observó una mayor EUN en suelos muy bien provistos de P, lo que podría explicar en parte la respuesta diferencial entre suelos y regiones relacionada a los bajos tenores de P en los suelos de Entre Ríos y vertisoles.

La eficiencia de uso de nitrógeno en los ensayos evaluados fue media a alta en comparación con reportes de otros países como Nueva Zelanda o Australia que informan valores de 10 a 20 kg MS/kg N (Smith, et al. 2019; Gray, 2023). Esto indicaría una importante deficiencia de Nitrógeno y condiciones propicias para su aplicación.

En verdeos de raigrás o avena, fue posible obtener respuestas mayores a 25 kg de materia seca por kg de N aplicado en dosis de fertilizante inferiores a 50 N kg/ha. Entre 20 y 25 kg MS/kg N en dosis de 50 a 100 N kg/ha y menos de 20 kg MS/kg N con dosis mayores. Estos valores fueron similares a los reportados por Marino y Berardo (2015).

La mayor conversión o EUN (35 kg MS/kg N) se observó con dosis de N inferiores a 68 kg/ha en suelos con menos de 3.5 % de materia orgánica. Pero también se pudo observar una relativamente alta EUN (26 kg MS/kg N) con dosis de N superiores a 68 kg/ha, en verdeos de avena, cebadilla o raigrás, sembrados en suelos muy bien provistos de P.

La fertilización con dosis de N superiores a 68 kg/ha en pasturas de consociadas de alfalfa o lotus con gramíneas, o raigrás con leguminosas, no sería conveniente, dado la baja respuesta (EUN=8 kg MS/kg N). Esto posiblemente sea debido al aporte de N que realizan las leguminosas por fijación biológica y transferencia hacia las gramíneas. Parte del N fijado se transfiere de las leguminosas a las gramíneas asociadas. La cantidad de N transferida "bajo tierra", predominantemente a través de la descomposición de raíces y nódulos de leguminosas, se ha estimado en 5 a 70 kg N/ha año o 2 a 26 % de la BNF. Bajo pastoreo, el N también se transfiere "por encima del suelo" a través del retorno en los excrementos animales y esto puede ser de una magnitud similar a la transferencia "por debajo del suelo" (Ledgard y Steele, 1992).

Este meta-análisis ha permitido sintetizar la información disponible sobre fertilización nitrogenada en pasturas cultivadas. Estableciendo algunas condiciones o pautas para comprender mejor las condiciones que promueven una mayor productividad de materia seca y la respuesta al nitrógeno.

El número de informes o ensayos a los que se tuvo acceso no permitió realizar un modelo que abarque la variabilidad de situaciones que pueden presentarse, como diferentes especies forrajeras, antecesores, suelos y fertilización. Sin embargo, se han podido establecer algunas condiciones donde es esperable mayor productividad de forraje y una conveniente eficiencia de uso del nitrógeno. En tal sentido, es evidente que para mejorar este estudio sería muy importante poder ampliar la base de datos y enriquecerla con más información complementaria para poder validar algunas hipótesis y al mismo tiempo poder mejorar el nivel de precisión en la predicción de la respuesta esperada a la fertilización nitrogenada en pasturas cultivadas. Seguramente existe más información no publicada en la Región Pampeana que sería de alto valor para fortalecer las conclusiones de este estudio.

En forma complementaria, otra forma de mejorar el nivel de precisión en la predicción de la respuesta esperada a la fertilización nitrogenada en pasturas cultivadas sería el desarrollo de una red de ensayos en la Región Pampeana que tuviera una extensión y duración que permita enriquecer a futuro dicha base de datos para poder repetir este análisis en distintos intervalos de tiempo. Obviamente que la principal limitación de esta opción es el costo y el tiempo requerido comparativamente al estudio que hemos finalizado, en el que se utilizó información ya generada en el pasado.

Si bien no podemos concluir que hayamos encontrado algún resultado inédito en el estudio que hemos realizado, debemos destacar que el logro más importante es haber confirmado en un estudio más amplio en extensión geográfica y temporal, niveles de respuestas a la fertilización nitrogenada en producción de materia seca de cultivos forrajeros que se encuentran en línea con la información antecedente pero que estaba muy desperdigada en el tiempo y en el espacio. Por lo cual, este trabajo de sistematización de la información disponible avanza tanto en ganar en la predicción de la respuesta esperada como una medida de la fuerza, (consistencia o confiabilidad) de la tecnología, como así también en un mejor entendimiento y jerarquización de los factores analizados que condicionan dicha respuesta.

De lo anterior, surgen con mayor claridad el entendimiento de los factores que afectan la productividad y la respuesta esperada generando distintos escenarios en los cuales se puede predecir con mejor precisión dicha respuesta y la eficiencia en el uso del insumo limitante. Esto último es imprescindible para el cálculo y el análisis de la relación insumo/producto, como así también poder optimizar el retorno económico de la inversión.

Ganar en precisión en la predicción de la respuesta esperada es de suma importancia para realizar actividades de extensión sobre las bondades productivas y la potencialidad económica de esta tecnología ante diferentes escenarios agronómicos y climáticos que deberán ser tenidos en cuenta para una correcta simulación de los resultados esperados. La precisión nunca es perfecta, pero cuanto más alta, mejor, y está estrechamente vinculada a la cantidad de datos que son utilizados en el estudio realizado.

El proyecto ha alcanzado mayormente los objetivos planteados inicialmente, ha dado difusión de sus resultados y ha contribuido a la integración de un equipo y la formación de recursos humanos.

Indicadores de producción

- Ojeda, J., Quinodoz, J. E., & Lezana, L. (2021). Estimación de disponibilidad forrajera de pasturas base alfalfa y verdeos invernales en el sudoeste de Entre Ríos. RIA Vol. 47 n.º 1 Abril 2021, Argentina Ediciones INTA. https://repositorio.inta.gov.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/9170/RIA_VOLUMEN47_n1_p.26-45.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Lezana L, Pautasso JM, Ré A, Quintero CE, Quinodoz JE. 2024. Metanálisis del Efecto de la Fertilización Nitrogenada en Verdeos Invernales y Pasturas Consociadas en la Pampa Mesopotámica. Revista Argentina de Producción Animal. Vol 44 N° 1: 13-28.
- Pautasso, Juan M.; Quinodoz, J.E.; Isaurralde, R.M. Respuesta a la fertilización nitrogenada de avena y raigrás en Entre Ríos. Planteos Ganaderos SD. AAPRESID 2019. <https://www.aapresid.org.ar/wp-content/uploads/2019/03/Planteos-Ganaderos-2019.pdf>
- Pautasso, Juan M.; Y. Peltzer; M. Giordano y L. Nogueira. ¿Se justifica la fertilización nitrogenada en pasturas consociadas? Planteos Ganaderos SD. AAPRESID 2021. https://issuu.com/aapresid/docs/planteos_ganaderos-2021-web
- Pautasso, J.M. Claves para la fertilización de pasturas perennes en el Centro Oeste de Entre Ríos. Artículo de difusión INTA - junio de 2021. <https://inta.gov.ar/documentos/claves-para-la-fertilizacion-de-pasturas-perennes-en-el-centro-oeste-de-entre-rios>
- Giordano, M.; Pautasso, J.; Butarelli, S. 2022. Fertilización de avena: exploración de respuesta a “multinutrientes”. Serie Extensión INTA Paraná N° 87, pág.69-75.
- Pautasso, JM.; JE. Quinodoz, L. Lezana, RM. Isaurralde, Y. Peltzer, M. Giordano, C. Quintero, E. Zufiaurre y J. Ojeda. Respuesta a la fertilización nitrogenada de avena y raigrás. En Actas del XXVII Congreso de la AACS 2020.
- Lezana, L.; Quintero, C.; Quinodoz, E.; Pautasso, J.; Re, A. 2022. Meta-análisis de la respuesta a la fertilización nitrogenada de pasturas y verdeos. XXVIII Congreso de la AACS 2022: 15-18 de noviembre de 2022.

Agradecimientos

Al Profesor Mauricio Fornalski Soares, de la Universidad Federal de Santa María, Brasil; por su colaboración en el análisis estadístico de árboles de regresión y clasificación. Al Ingeniero Alejo Re de la Estación Experimental Agropecuaria Concepción del Uruguay de INTA, por compartir datos de ensayos no publicados.

BIBLIOGRAFÍA

- AGNUSDEI M., S. ASSUERO, F. LATTANZI Y M. MARINO. 2010. Critical N concentration can vary with growth conditions in forage grasses: implications for plant N status assessment and N deficiency diagnosis. Nutrient Cycling in Agroecosystems (2010) 88:215–230. DOI 10.1007/s10705-010-9348-6
- AGNUSDEI, M. 2012. Rol de la ecofisiología en el diseño de manejos especializados de pasturas. En Pasturas 2012: hacia una ganadería competitiva y sustentable. Jornada técnica. Síntesis de material de conferencias. Mar del Plata 23 de marzo de 2012. Páginas 13-28.
- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R., Stone, C., 1984. Classification and Regression Trees. Chapman and Hall/CRC, California.

- BORENSTEIN, M., COOPER, H., HEDGES, L., & VALENTINE, J. 2009. Effect sizes for continuous data. In: *The handbook of research synthesis and meta-analysis*, 2, 221-235.
- Clark, L.A., Pregibon, D., 1992. *Tree-Based Models in Statistical Models*. Wadsworth and Brooks, California.
- Colin Gray 2023. Nitrogen fertiliser use in grazed pasture-based systems in New Zealand: a summary, *New Zealand Journal of Agricultural Research*, DOI: 10.1080/00288233.2023.2198719
- CORRENDO, A.A., F. SALVAGIOTTI, Y F.O. GARCÍA, Y F.H. GUTIÉRREZ-BOEM. 2017. A modification of the arcsine-log calibration curve for analyzing soil test value–relative yield relationships. *Crop & Pasture Science* 68(3):297- 304, doi:10.1071/CP16444.
- DYSON, C.B., Y M.K. CONYERS. 2013. Methodology for online biometric analysis of soil test-crop response datasets. *Crop & Pasture Science* 64, 435-441.
- FIXEN, P. 2016. Evidence-based agronomy: filling the gaps in soil fertility/nutrient management data. *Great Plains Soil Fertility Conference*. Denver, Colorado, EE.UU.
- GARCÍA, F.O., F. MICUCCI, G. RUBIO, M. RUFFO, E I. DEVEREDE. 2002. Fertilización de forrajeras en la región pampeana. Edición INPOFOS. ISBN 987-20486-0-6. 72 páginas.
- HIGGINS, J. P.T.; THOMPSON, S. G. 2002. Quantifying Heterogeneity in a Meta-Analysis. *Statistics in Medicine* 21(11): 1539-58.
- INDEC. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. 2021. *Censo Nacional Agropecuario 2018 resultados definitivos / 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires*.
- Kuhn, M. 2008. Building Predictive Models in R Using the caret Package. *Journal of Statistical Software*, 28(5), 1–26. <https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05>
- LEWIS, S., & CLARKE, M. 2001. Forest plots: trying to see the wood and the trees. *Bmj*, 322(7300), 1479-1480.
- Ledgard S. F.; K. W. Steele. 1992. Biological nitrogen fixation in mixed legume/grass pastures. *Plant Soil* 141, 137–153. <https://doi.org/10.1007/BF00011314>
- MEAD, R., R.N. CURNOW, Y A.M. HASTED. 1993. *Statistical methods in agriculture and experimental biology*. Chapman and Hall, London, 415p.
- MARINO, M. Y Á. BERARDO. 2015. Pasturas y pastizales. Pp. 555-583. En: H. Echeverría y F. García (eds.). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- MARINO, M. A, & ECHEVERRÍA, H. E. 2018. Diagnosis of phosphorus requirement for alfalfa (*Medicago sativa* L.) in argiudols. *Agriscientia*, 35(1), 11-24. Recuperado en 16 de junio de 2023, de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1668298X2018000100002&lng=es&tlng=en.
- MARTÍN, J. L. R., MARTÍN-SÁNCHEZ, E., TORRALBA, E., DOMÍNGUEZ, E. D., LURUEÑA-SEGOVIA, S., & MORENO, F. A. 2008. Capítulo 9: Investigación secundaria: la revisión sistemática y el metaanálisis. *SEMERGEN-Medicina de Familia*, 34(1), 11-16.
- Mourtzinis, S., Rattalino Edreira, J.I., Grassini, P., Roth, A., Ciampitti, I.A., Licht, M.A., Kandel, H., Kyveryga, P.M., Lindsey, L.E., Mueller, D.S., Nafziger, E., Naeve, S.L., Stanley, J., Staton, M.J., Conley, S.P., 2018. Sifting and winnowing: analysis of farmer field data for soybean in the US north-central region. *Field Crop Res.* 221,130–141.
- NEYELOFF, J. L., FUCHS, S. C., & MOREIRA, L. B. 2012. Meta-analyses and Forest plots using a microsoft excel spreadsheet: step-by-step guide focusing on descriptive data analysis. *BMC research notes*, 5(1), 1-6.

- PAUTASSO, J. M. Y BARBAGELATA, P. A. 2017. Actualización del umbral de fósforo Bray para el cultivo de alfalfa en Entre Ríos (Argentina). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 26, 13-16.
- PAUTASSO, J.M.; P.A. BARBAGELATA, M. GIORDANO, Y. PELTZER, M. CIAN Y M. LORENZÓN. 2022. Efecto de la fertilización nitrogenada en pasturas consociadas. En actas del XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 15 al 17 de noviembre del 2022. Bs As.
- R Core Team. 2021. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <https://www.R-project.org>
- Ribas, G.G., Streck, N.A., Duarte Junior, A.J., Ribeiro, B.S.M.R., Pilecco, I.B., Rossato, I. G., Zanon, A.J., 2020. An update of new flood-irrigated rice cultivars in the SimulArroz model. *Pesq. Agrop. Brasileira* 55, 1-10.
- Ribas, G.G., Zanon, A.J., Streck, N.A., Pilecco, I.B., Souza, P.M.; Heinemann, A.B.; Gracini, P. 2021. Assessing yield and economic impact of introducing soybean to the lowland rice system in southern Brazil. *Agricultural Systems* 188 -103036. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103036>
- RIZZO, Gonzalo; AGUS, Fahmuddin; BATUBARA, Siti Fatimah; ANDRADE, José F.; EDREIRA, Juan I. Rattalino; PURWANTOMO, Dwi K.G.; ANASIRU, Rahmat Hanif; MAINTANG; MARBUN, Oswald; NINGSIH, Rina D. 2023. A farmer data-driven approach for prioritization of agricultural research and development: a case study for intensive crop systems in the humid tropics. *Field Crops Research*, [S.L.], v. 297, p. 108942, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108942>.
- RUBIO, G., F. MICUCCI, Y F.O. GARCÍA. 2013. Capítulo 14: Ciclado de nutrientes y fertilización de pasturas. En: *Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana*. Editorial Facultad de Agronomía. UBA. ISBN 978-987-27793-7-5. Páginas 263-292.
- SHEAFFER, C.C., J.L. HALGERSON, Y H.G. JUNG. 2006. Hybrid and N Fertilization Affect Corn Silage Yield and Quality. *Journal of agronomy and crop science*. Volume 192, Issue 4. August 2006. Pages 278-283.
- ST-PIERRE, N. R. 2001. Invited review: integrating quantitative findings from multiple studies using mixed model methodology1. *Journal of dairy science*, 84(4), 741-755.
- Tagliapietra, E.L; Zanon, A.J., Streck, N.A., Balest, D.S.; da Rosa, S.L.; Bexaira, K.P; Richter, G.L.; Ribas, G.G., da Silva, M.R. 2021. Biophysical and management factors causing yield gap in soybean in the subtropics of Brazil. *Agronomy Journal*. 1-13. DOI:10.1002/agj2.20586
- Therneau, T.M., Atkinson, E.J., 1997. An Introduction to Recursive Partitioning Using the RPART Routines, Technical Report 61. Section of Biostatistics, Mayo Clinic, Rochester. <http://www.mayo.edu/hsr/techrpt/61.pdf>.
- THILAKARATHNA, M.; M. MCELROY & T. CHAPAGAIN. 2016. Belowground nitrogen transfer from legumes to non-legumes under managed herbaceous cropping systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 36, 58 (2016). <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0396-4>.

PID 2213

Denominación del Proyecto

Meta-análisis para la calibración y validación de un modelo matemático de respuesta a la fertilización nitrogenada de pasturas cultivadas

Director

César Eugenio Quintero

Codirector

Juan Enrique Quinodoz

Unidad de Ejecución

Universidad Nacional de Entre Ríos

Dependencia

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Contacto

cesar.quintero@uner.edu.ar

Cátedra/s, área o disciplina científica

Edafología, Forrajicultura

Instituciones intervinientes públicas o privadas.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)

Integrantes del proyecto

Docentes UNER: Rubén Isaurralde; Juan M. Pautasso; Lucrecia Lezana. Integrante becario de formación vinculado a PID: Esmeralda M. Zufiarre

Fechas de iniciación y de finalización efectivas

15/08/2019 y 07/07/2023

Aprobación del Informe Final por Resolución C.S. N° 137/24 (24-05-2024)