

Diagnóstico de requerimiento de fósforo para alfalfa (*Medicago sativa* L.) en argiudoles

Marino, M. A. y Echeverría, H. E.

RESUMEN

Se planteó determinar el nivel crítico (NC) de P Bray en suelo y confeccionar guías de fertilización fosfatada para alfalfa en suelos Argiudoles. Se reanalizaron resultados de producción de materia seca (MS) y respuesta a P de cuatro años. Se evaluó la relación entre el rendimiento relativo (RR) de MS y P Bray con modelos logarítmico, cuadrático, lineal-plateau, cuadrático-plateau y arco-seno-logaritmo (ALCC modificado). El ALCC modificado cumplió el supuesto de homogeneidad de varianza y explicó el mayor porcentaje de variación entre el RR y el P Bray ($R^2= 0,87$). La estimación del NC ($18,1 \text{ mg kg}^{-1}$, intervalo de confianza $15,8$ y $20,1 \text{ mg kg}^{-1}$) coincide con el determinado en otros ambientes. Se calibraron siete categorías de P Bray y se confeccionaron guías para la fertilización y refertilización según el criterio de suficiencia, y de reconstrucción y mantenimiento. Para 5 mg kg^{-1} de P Bray la dosis de superfosfato según el criterio de suficiencia fue de 118 kg ha^{-1} , para el criterio de reconstrucción y mantenimiento las dosis variaron de 160 a 248 kg ha^{-1} con producciones objetivo de 8 a 15 Mg MS ha^{-1} , respectivamente. Esta información permitirá un uso más racional de los fertilizantes en pasturas de alfalfa.

Palabras clave: leguminosa forrajera, nutrición fosfatada, calibración del análisis de suelo, recomendación de fertilización.

Marino, M. A. and Echeverría, H. E., 2018. Diagnosis of phosphorus requirement for alfalfa (*Medicago sativa* L.) in argiudols. Agriscientia 35: 11-24

SUMMARY

The aim of this work was to determine the soil Bray P critical level (CL) and to develop phosphate fertilization guidelines for alfalfa in Argiudolls soils. Results from four years' dry matter production (DM) and P response were re-analyzed. The relationship between DM relative yield (RY) and Bray P was evaluated with logarithmic, quadratic, linear-plateau, quadratic-plateau and arcsine-logarithm models (modified ALCC). The modified ALCC model fulfilled the assumption of homogeneity of variance and explained the greater percentage of variation between RY and P Bray ($R^2= 0.87$). The CL (18.1 mg kg^{-1} , confidence interval between 15.8 and 20.1 mg kg^{-1}) coincides with those

determined in other environments. Seven Bray P categories were calibrated and guidelines were designed for fertilization and refertilization according to the sufficiency, reconstruction and maintenance criteria. For 5 mg kg⁻¹ Bray P, the recommended superphosphate rate was 118 kg ha⁻¹ according to the sufficiency criterion. According to the reconstruction and maintenance criteria, the recommended P rate ranged from 160 to 248 kg ha⁻¹, for target production of 8 to 15 Mg MS ha⁻¹, respectively. This information will allow a more rational use of phosphate fertilizers in alfalfa pastures.

Key words: forage legume, phosphate nutrition, soil analysis calibration, fertilization recommendation.

Marino, M. A. y Echeverría, H. E.: Unidad Integrada Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata, Estación Experimental Agropecuaria, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Correo Postal Ruta 226 Km 73,5. CC 276. (7620), Balcarce, Buenos Aires. Correspondencia a: marino.mariaa@inta.gov.ar

INTRODUCCIÓN

La alfalfa (*Medicago sativa* L.) es la leguminosa forrajera más importante para la producción de carne y de leche de la región pampeana. Además, su participación en las rotaciones es valorada debido a su capacidad de incorporar nitrógeno a los sistemas a través de la fijación biológica (Anglade, Billen y Garnier, 2015). En el país se estima un área sembrada con esta especie de aproximadamente 4,7 millones de ha, con potenciales productivos (principalmente en la época primavera-estivo-otoñal) cercanos a 20 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Basigalup, 2007). Sin embargo, en general los rendimientos logrados suelen ser inferiores debido frecuentemente a deficiencias nutricionales.

Optimizar la productividad de los sistemas agropecuarios depende en gran medida de un adecuado suministro de nutrientes. Para los suelos de la región pampeana húmeda, el fósforo (P) ha sido identificado como limitante para la producción de los cultivos (Sainz Rozas, Echeverría y Angelini, 2012) y se ha demostrado que su deficiencia restringe la producción forrajera de las pasturas de alfalfa (Quintero, Boschetti y Benavidez, 1995; Berardo y Marino, 2000b; Sevilla y Agnusdei, 2016). Por ello la fertilización fosfatada es una práctica recomendada, aunque aplicaciones en cantidades inadecuadas –ya sea por defecto (ganadería extensiva) o por exceso (ganadería intensiva)– ocasionan perjuicios productivos y ambientales (Weaver y Wong, 2011). Para ajustar la aplicación de P al mínimo requerido para alcanzar los rendimientos potenciales en cada ambiente (nivel crítico, NC), se han calibrado métodos de diagnóstico basados en el análisis

de muestras de suelo (Echeverría y García, 1998; García, Picone y Ciampitti, 2015). Normalmente, los NC se estiman aplicando un criterio productivo que procura lograr el 85-95 % del rendimiento relativo respecto al máximo sin deficiencia de P (RR) (Barbazán y García, 2015). Al respecto, la información disponible se refiere principalmente a cultivos agrícolas y, en menor medida, a pasturas.

El desarrollo de un método de diagnóstico requiere cumplir tres etapas: correlación, calibración e interpretación (Dahnke y Olson, 1990). En la primera se debe determinar la asociación entre el rendimiento del cultivo y la cantidad de P extraída por un determinado análisis de suelo, cuanto mayor sea el coeficiente de determinación más apropiado será el método. Para los suelos de la región pampeana, el método de análisis de P calibrado se basa en el extractante P Bray (Bray y Kurtz, 1945); este determina una pequeña fracción del contenido total del P del suelo que se asocia a la cantidad de P tomada por la planta (Havlin, Beaton, Tisdale y Nelson, 2005). Por lo tanto, es un índice empírico que estima la disponibilidad del nutriente y no el contenido total en el suelo. En esta etapa se determina el NC de P Bray para un determinado nivel de rendimiento (García *et al.*, 2015). El NC permite distinguir sitios con y sin respuesta a la fertilización y se puede determinar con ecuaciones de tipo logarítmica, cuadrática, lineal-plateau o cuadrática-plateau, entre otras. Los resultados de estas funciones no son coincidentes y ninguna refleja perfectamente la respuesta de los cultivos (Ron, 2003). El problema de estos modelos es que ambas variables (rendimiento y P Bray) son aleatorias y, por lo tanto, no se cumple con el requisito de que solo la variable independiente lo sea. Además,

rara vez las variables cumplen con el supuesto de homocedasticidad (homogeneidad de las varianzas) y de normalidad. Esta situación deriva en falta de robustez y confiabilidad estadística en los valores estimados a partir de estos modelos (Álvarez, 2008).

El método de la curva de calibración arcoseno-logaritmo (ALCC, Dyson y Convers, 2013) se presenta como una metodología alternativa para estimar el NC de P Bray para un determinado nivel de rendimiento. Este método transforma ambas variables, lo que mejora el comportamiento de los resultados respecto de los supuestos de normalidad del error y homogeneidad de varianza. Además, la modificación efectuada por Correndo, Salvaggiotti, García y Gutierrez-Boem (2017a), incorpora un componente de error que permite la determinación del intervalo de confianza (IC) del NC y posibilita su comparación entre grupos o subgrupos de casos con un nivel de certidumbre estadística. Estos autores, empleando un set de datos correspondiente a una revisión de 265 experimentos de fertilización con P en maíz en la región pampeana, concluyen que el método ALCC modificado se presenta como una alternativa superadora para la estimación de NC de nutrientes y del IC, respecto a los métodos tradicionales.

En la etapa de calibración se debe establecer la probabilidad de respuesta a la fertilización con P cuando el resto de los otros nutrientes no son limitantes, y calificar de manera cualitativa el resultado cuantitativo del análisis de suelo. Por último, en la etapa de interpretación, se debe determinar una primera aproximación de la dosis de fertilizante a agregar para lograr el rendimiento objetivo. El posterior ajuste de esta recomendación, dependerá del conocimiento de las condiciones climáticas y del manejo agronómico y económico del sistema de producción. Diferencias en las dosis de P recomendadas también se relacionan con el criterio para interpretar el significado del análisis de suelo. Los criterios más difundidos son los de suficiencia y de construcción-mantenimiento (Mallarino, 2006). El concepto de nivel de suficiencia establece que existe respuesta significativa al agregado de P solo cuando el nivel de P Bray es inferior al NC y determina la dosis de fertilización fosfatada de acuerdo al valor de P Bray, buscando maximizar la eficiencia agronómica y el retorno de la inversión en fertilizante. Por su parte, el concepto de construcción y mantenimiento establece la necesidad de fertilización cuando el nivel de P Bray es inferior al NC con dosis calculadas no solo para maximizar el rendimiento, sino para incrementar el valor de P Bray hasta un nivel óptimo en un plazo determinado (Mallarino, 2006).

Lograr una acertada interpretación de un análisis de suelo es particularmente ambicioso si se considera que esto se realiza en la presiembra de los cultivos anuales, o previo al período productivo de especies perennes, cuando todavía se desconocen las características meteorológicas que controlarán el crecimiento de las plantas. En otras palabras, el grado de incertidumbre es elevado (Dahnke y Olson, 1990; Echeverría y García, 1998; García *et al.*, 2015) y en general, los niveles de un nutriente en suelo explican no más de 40 a 60 % del rendimiento o respuesta del cultivo (Correndo y García, 2017).

En ensayos de fertilización fosfatada de alfalfa en el sudeste bonaerense se registraron respuestas significativas en la producción de materia seca (MS). Un modelo exponencial permitió describir la relación entre el contenido de P Bray y la producción de MS en Argiudoles. Según este modelo, la máxima producción de MS de alfalfa se alcanzó con contenidos de P Bray entre 25 y 30 mg P kg⁻¹ (Berardo y Marino, 2000a). Otros autores mencionan umbrales similares para suelos del norte de Buenos Aires, Santa Fe y Entre Ríos (Quintero *et al.*, 1995; Diaz Zorita y Gambaudo, 2007; Rubio, Micucci y García, 2013), pero no se indica si los modelos ajustados cumplen con los supuestos estadísticos mencionados. Según estos autores los niveles de P Bray requeridos por pasturas de alfalfa para maximizar el rendimiento de forraje serían superiores a los de los cultivos de maíz y de trigo, lo que no coincide con trabajos realizados previamente en otros países (Fixen y Grove, 1990). En la actualidad se busca desarrollar estrategias de fertilización que permitan ajustar las dosis de nutrientes aplicadas para satisfacer la demanda de los cultivos, lograr el mayor beneficio productivo y económico y minimizar el impacto ambiental (Cade-Menun, Doody, Liu y Watson, 2017).

En este trabajo se plantea determinar el NC y el IC de P Bray para la producción de MS de alfalfa en Argiudoles del sudeste bonaerense aplicando el método ALCC modificado y comparar sus resultados con otros métodos habitualmente utilizados para cuantificar el nivel de fertilidad fosfatada de suelos en Argentina. Además, se propone confeccionar una guía de fertilización fosfatada para alfalfa que integre los requerimientos de la misma con la oferta de P Bray del suelo. Se espera contribuir a mejorar el uso eficiente de los fertilizantes fosfatados, la sostenibilidad del recurso suelo y a la sustentabilidad de los sistemas productivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para este trabajo se utilizaron resultados de experimentación con fertilización fosfatada en alfalfa, obtenidos en la Unidad Integrada FCA-EEA INTA Balcarce (37° 45' S, 58° 18' O) en un suelo Argiudol típico con 10,3 mg kg⁻¹ de P, 6,2 de pH y 6,4 % de materia orgánica (Berardo y Marino, 2000a). Se sembró alfalfa de corta latencia invernal (GT 13 R Plus), a razón de 10 kg ha⁻¹ de semilla viable, previamente inoculada con *Rhizobium meliloti*. Los tratamientos fueron cuatro dosis de P aplicado al voleo a la siembra: 0, 25, 50 y 100 kg ha⁻¹ de P, (0P, 25P, 50P y 100P); y uno de refertilización anual con 100 kg ha⁻¹ de P aplicado en otoño sobre una dosis inicial de 50 kg ha⁻¹ de P (50P+100P), utilizando como fuente fosfatada superfosfato triple (SFT, 20 % de P). Se utilizó diseño en bloques completamente aleatorizados con tres repeticiones (unidad experimental 2 x 6 m).

La producción anual de MS en 1995-1996, 1996-1997, 1997-1998 y 1998-1999 (cuatro cosechas por año efectuadas durante el período de crecimiento primavera-estivo-otoñal), se determinó por medio de cortes de la biomasa aérea realizados cuando el cultivo presentaba aproximadamente 10 % de floración. Se recolectaron y pesaron los 6 m² centrales de cada parcela, utilizando una motosegadora automotriz (altura de corte = 2,5 cm). Para cada unidad experimental una muestra del forraje fue secada para estimar el porcentaje de MS y la producción de materia seca de forraje (Mg ha⁻¹). Se calcularon los rendimientos relativos (RR) como:

$$RR = \text{rendimiento observado} / \text{rendimiento máximo promedio} * 100$$

En otoño de cada año y para cada tratamiento se extrajeron muestras superficiales de suelo (0 a 20 cm de profundidad) para determinar el contenido de P Bray. El efecto de la fertilización fosfatada sobre la disponibilidad de P en el suelo y su relación con la producción de MS (expresada en términos de RR) fueron descritos con modelos logarítmico, cuadrático, lineal-plateau, cuadrático-plateau y ALCC modificado, para lo cual en cada uno se relacionó el valor de RR en función del nivel de P Bray:

El modelo logarítmico es definido como:

$$RR = a + b \ln P \text{ Bray}$$

donde a es la ordenada al origen y b el coeficiente lineal.

El modelo cuadrático es definido como:

$$RR = a + b P \text{ Bray} - c P \text{ Bray}^2$$

donde a es la ordenada al origen, b el coeficiente lineal y c el coeficiente cuadrático.

El modelo lineal-plateau es definido como:

$$RR = a + b P \text{ Bray} \quad \text{si } P \text{ Bray} < C \quad RR = P \quad \text{si } P \text{ Bray} > C$$

donde a es la ordenada al origen, b es el coeficiente lineal, C es el NC (donde ocurre la intercepción entre la fase de respuesta lineal y el plateau) y P es el RR plateau.

El modelo cuadrático-plateau es definido como:

$$RR = a + b P \text{ Bray} + c P \text{ Bray}^2 \quad \text{si } P \text{ Bray} < C \\ RR = P \quad \text{si } P \text{ Bray} > C$$

donde a es la ordenada al origen, b el coeficiente lineal, c el coeficiente cuadrático, C es NC (donde ocurre la intercepción entre la fase cuadrática y el plateau) y P es el RR plateau.

Los modelos logarítmico y cuadrático se ajustaron con el paquete Excel. Los modelos lineal plateau y cuadrático plateau se realizaron con el Software Table Curve (Jandel Scientific, Corte Madera, CA).

El método ALCC (Dyson y Conyers, 2013), se estimó según una modificación al modelo original (Correndo, Gutiérrez-Boem, Salvagiotti y García, 2016), para lo cual se calculó el logaritmo natural de P Bray (variable Y) y el arcoseno raíz cuadrada del RR (variable X). Se invirtió el sentido de la relación Y (ln P Bray) vs. X (arcsen RR) y se centraron los valores de X al 90 % de RR de manera de obtener el NC como parámetro de una función lineal. Para ello se estimó una regresión lineal bivariada (ln P Bray = $a + b$ arcsen RR centrados) por el método de ejes principales estandarizados, SMA por sus siglas en inglés (Standardized Major Axis). El valor de a es el ln NC, que como está expresado en unidades logarítmicas, es necesario retransformar a las unidades originales mediante su recíproca. De la misma manera, la curva de ajuste corresponde a la recíproca de la función SMA. Se determinó el IC del NC, con un nivel de confianza de 95 %. El método ALCC modificado se ajustó con paquete Excel (Correndo, Salvagiotti, García y Gutiérrez-Boem, 2017b). Para todos los modelos, se graficaron los residuales (RR observados menos RR predichos).

En la etapa de calibración se calificaron de manera cualitativa los resultados cuantitativos de P Bray. Para ello se empleó la relación entre el RR y el valor de P Bray descripta matemáticamente, utilizando el método de ALCC modificado. Se consideró que el rendimiento máximo económico se alcanza cuando el RR logra un valor de 90 %. Luego, siguiendo las pautas de Mallarino (2006), se agruparon los suelos en cinco categorías según la concentración de P Bray: 1) muy baja concentración cuando el RR fuese menor al 60 %; 2) baja concentración con RR entre el 60 y 85 %;

3) óptima concentración con probabilidad de RR entre 85 y 93 %; mientras que las categorías 4 y 5 correspondieron a alta y muy alta concentración de P Bray, siendo el rendimiento máximo. Adicionalmente, se incluyó una sexta categoría de concentración de P Bray excesiva que considera la posibilidad de pérdida de P por escurrimiento, y la eventual contaminación de cuerpos de agua (Alfaro *et al.*, 2009; Zamuner, Lloveras y Echeverría, 2015).

En la etapa de interpretación se siguieron los criterios de suficiencia y de reconstrucción y mantenimiento. Para la primera, se generaron recomendaciones de fertilización en base a la respuesta en la producción anual de forraje según el contenido de P Bray en suelo. Para estimar la biomasa total de la cubierta, se consideró un incremento del 35 % en concepto de biomasa de raíces (Khaiti y Lemaire, 1992; Brown, Mooty y Texeira, 2006). El incremento en MS total se ponderó por el requerimiento de P de 2,5 kg Mg⁻¹ de MS. Para el segundo año y posteriores, la recomendación de refertilización se deberá determinar en función del P Bray del suelo, independientemente del destino de la pastura.

Para el criterio de construcción y mantenimiento y cuando el nivel de P Bray es muy bajo, la recomendación de fertilización surge de considerar el rendimiento objetivo y la respuesta en producción de MS, ponderada por el requerimiento de P (2,5 kg P Mg⁻¹). Además, se debe adicionar la cantidad de P necesaria para incrementar el contenido de P del suelo para que en un período de cuatro a cinco años se logre llegar al NC de P Bray. Para Argiudoles del sudeste bonaerense se consideró un valor de 6 kg P para incrementar un mg ha⁻¹ de P Bray (Wyngaard, Sainz Rozas, Echeverría y Divito, 2012). Cuando el contenido de P Bray es bajo, el cálculo es similar pero el enriquecimiento de P y la respuesta al P aplicado serán de menor magnitud. Para ello se definirá un factor de corrección con base en los resultados obtenidos con el método ALCC modificado. Cuando el contenido de P Bray es el NC, solo se debería considerarla reposición del P requerido para cubrir la demanda promedio de la pastura, sin incorporar el enriquecimiento de P del suelo.

Para el cálculo de la cantidad de fertilizante fosfatado a aplicar en el segundo y tercer año, se deberá considerar el destino de la producción. Si el destino es la recolección mecánica de forraje, sin discriminar entre las posibles alternativas (fardos, megafardo, rollo, etc.), la dosis a aplicar será la misma del primer año, para poder continuar el enriquecimiento del suelo con P. Pero si el destino del forraje es el pastoreo, se debería reducir en un

30 % la dosis del primer año como consecuencia de: a) que aproximadamente 15 % del P tomado por la planta es retornado al suelo con el forraje no consumido por los animales, y b) el retorno al suelo a través de las deyecciones (Block, Erickson y Klopfenstein, 2004; Alfaro *et al.*, 2009). Esto reduce la exportación de P del sistema y permite disminuir las dosis a aplicar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las condiciones hídricas y térmicas de cada año y los promedios históricos se presentan en la Figura 1 a y b. Si bien la suma de precipitaciones anuales correspondientes a cada año fue variable (desde 636 mm en 1995 a 945 mm en 1996), las precipitaciones en el período de mayor crecimiento de alfalfa (octubre a marzo) fueron semejantes entre años y cercanas al promedio histórico correspondiente a esos meses (654 mm) (Figura 1a). Por su parte, la temperatura media del aire durante los períodos experimentales fueron semejantes al promedio histórico para esa época (Figura 1b).

La aplicación de P incrementó ($P < 0,05$) la

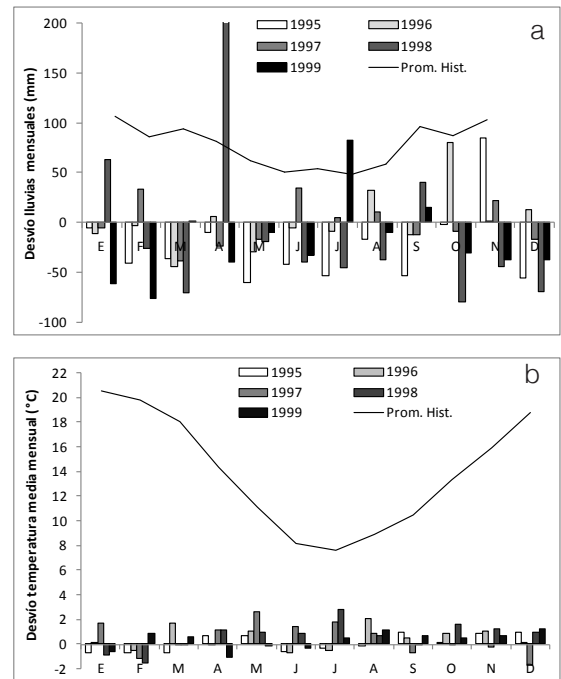


Figura 1: a) Desvíos de la lluvia mensual (barras) en mm y b) desvíos de la temperatura diaria media mensuales (barras) en °C para 1995, 1996, 1997, 1998 y 1999 con respecto a los valores promedios históricos de 45 años (líneas llenas) para Balcarce. Fuente: Agrometeorología EEA INTA Balcarce.

producción de forraje, obteniéndose para el tratamiento 0P y con la máxima dosis de P 10047 y 20240 kg MS ha⁻¹ en el primero, 9104 y 15620 kg MS ha⁻¹ en el segundo, 7599 y 11454 kg MS ha⁻¹ en el tercero, y 8212 y 11929 kg MS ha⁻¹ en el cuarto año, respectivamente (Tabla 1) (Berardo y Marino, 2000b). En el primer año la mayor producción de forraje se registró con la dosis de 100 kg P ha⁻¹, y en los años posteriores esta dosis no difirió significativamente del tratamiento con fertilización anual (Tabla 1). Estos niveles de producción concuerdan y aun superan a los obtenidos en otras zonas productoras (Quintero *et al.*, 1995; Cangiano, 2011; Díaz Zorita y Gambaudo, 2007).

Correlación

El contenido de P Bray explicó el 74 % de la variación del RR de alfalfa cuando se empleó el ajuste de tipo logarítmico, siendo el NC para lograr 90 % del RR de 25 mg kg⁻¹ de P Bray (Figura 2). No obstante, la distribución de los residuales presentó falta de homogeneidad (Figura 2). Un comportamiento similar se registró cuando se empleó un modelo cuadrático, ya que si bien pudo explicar el 70 % de la variación del RR con un NC algo menor (22 mg kg⁻¹ para alcanzar el 90 % del RR), la distribución de residuales continuó siendo

heterogénea (Figura 3). La falta de cumplimiento del supuesto de homogeneidad de la distribución de los residuales, cuestionan la robustez y validez de los NC mencionados.

Para los modelos lineal plateau (Figura 4) y cuadrático plateau (Figura 5) también se determinaron elevados ajustes (R² de 0,80 y de 0,81, respectivamente), pero con NC diferentes (14,9 y 19,7 mg kg⁻¹, respectivamente). De todos modos estos modelos tampoco fueron robustos en cuanto a la distribución de los residuales (Figuras 4 y 5, respectivamente).

Resumiendo, los NC de P Bray determinados variaron según el modelo ajustado y fueron menores para el lineal-plateau, mayores para el logarítmico e intermedios para cuadrático plateau y cuadrático. Según Cerrato y Blackmer (1990), el modelo lineal-plateau sobreestimaría el RR en la zona de la curva de respuesta cercana al nivel óptimo de P es consistente con la naturaleza de este modelo ya que posee una abrupta discontinuidad, que es difícil de justificar biológicamente y resulta en un NC demasiado bajo. Por el contrario, los modelos logarítmico y cuadrático tienden a sobreestimar el NC debido a la convexidad que el modelo describe y la escasa pendiente de la curva en el rango de P Bray inferior al óptimo. Por lo mencionado, la utilización de estos modelos definieron NC superiores a los

Tabla 1: Producción anual y total acumulada de materia seca de alfalfa en función de las dosis de P aplicado.

Dosis P	1° año	2° año	3° año	4° año	Producción Acumulada
	kg ha ⁻¹				
0	10047 c	9105 c	7599 c	8212 b	34963 c
25	14267 b	11792 bc	9144 bc	10001 b	45203 c
50	16000 b	12905 ab	9316 bc	9049 b	47270 bc
100	20240 a	15620 a	11454 ab	11929 ab	59242 ab
50+100	---	14973 ab	14406 a	15324 a	61609 a

Valores seguidos por diferentes letras dentro de cada año indican diferencias significativas entre tratamientos. Test de Duncan (P=0,05).

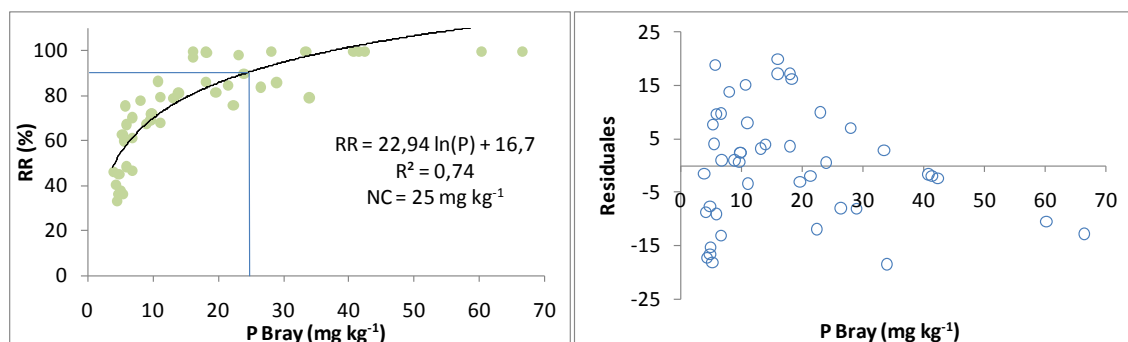


Figura 2: Ajuste logarítmico (izquierda) y residuales (derecha) entre el rendimiento relativo (RR) de alfalfa en función de fósforo Bray en el suelo (P Bray).

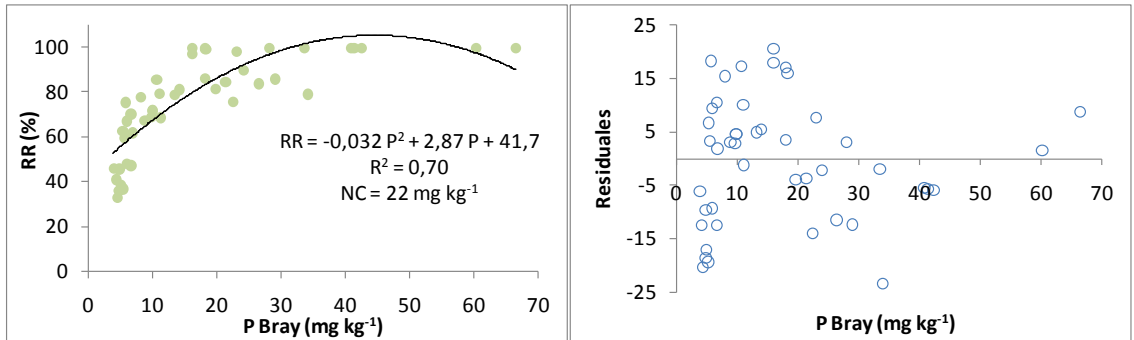


Figura 3: Ajuste cuadrático (izquierda) y residuales (derecha) entre el rendimiento relativo (RR) de alfalfa en función de fósforo Bray en el suelo (P Bray).

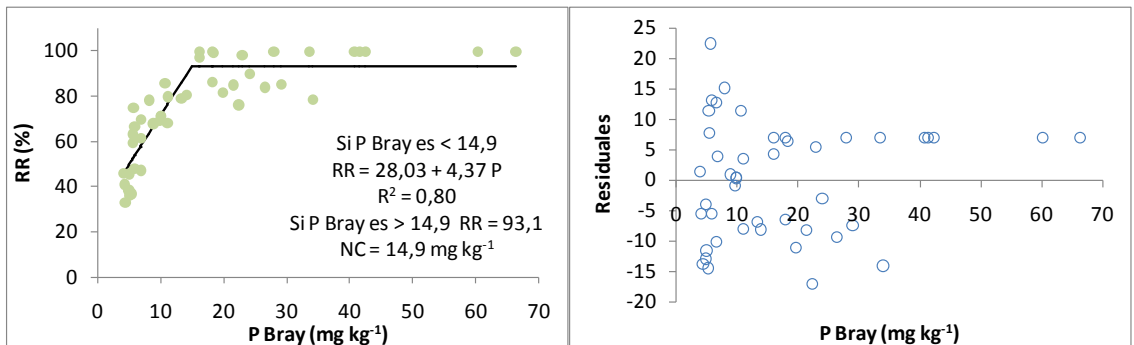


Figura 4: Ajuste lineal-plateau (izquierda) y residuales (derecha) entre el rendimiento relativo (RR) de alfalfa y en función de fósforo Bray en el suelo (P Bray).

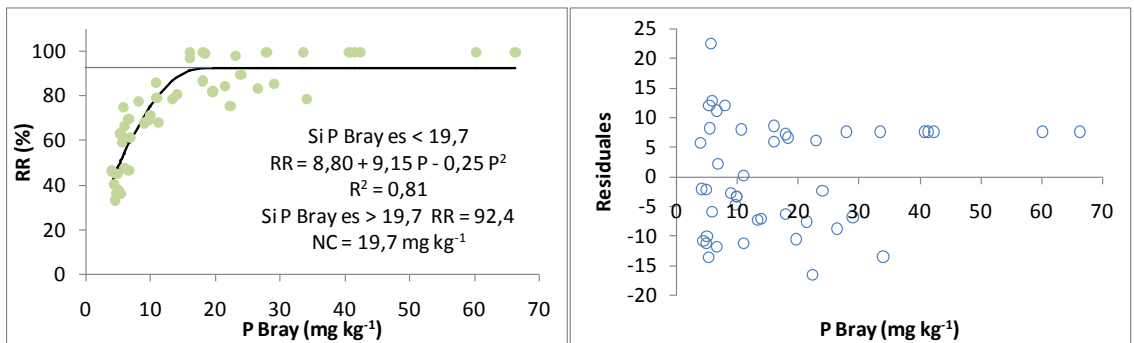


Figura 5: Ajuste cuadrático-plateau (izquierda) y residuales (derecha) entre el rendimiento relativo (RR) de alfalfa y en función de fósforo Bray en el suelo (P Bray).

requeridos para un abastecimiento adecuado de P. Los autores concluyen que el modelo cuadrático-plateau describe en forma más adecuada el RR, ya que determina un NC aparentemente sin sesgo y agrónomicamente aceptable (Pagani, Echeverría, Sainz Rozas y Barbieri, 2008). De todos modos, los modelos citados no cumplen con el supuesto de homogeneidad de varianzas, particularmente a valores de P Bray cercanos al NC, por lo que su estimación es poco confiable.

Cuando se ajustó el modelo ALCC modificado (Correndo *et al.*, 2017a), este superó a todos los modelos mencionados al explicar la mayor

proporción de la variación del RR de alfalfa en función del contenido de P Bray (87 %). El ALCC modificado presentó el mayor coeficiente de regresión con una menor tendencia a sobreestimar el RR para concentraciones bajas de P Bray, sin subestimar el RR a mayores concentraciones de P Bray. Esto indica que el modelo ALCC modificado permitiría obtener estimaciones que se ajustan al comportamiento agronómico observado (Figura 6). Según este modelo el NC para lograr 90 % del RR fue de $18,1 \text{ mg kg}^{-1}$ de P Bray (Figura 6). A diferencia de los otros modelos, el ALCC modificado presenta un aceptable grado de dispersión de los residuos,

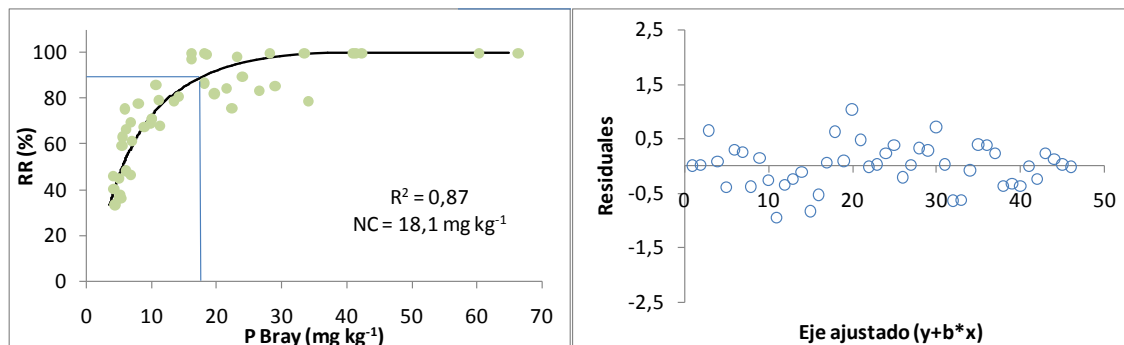


Figura 6: Ajuste para el modelo ALCC modificado (izquierda) y residuales entre el rendimiento relativo (RR) de alfalfa y el fósforo Bray en el suelo (P Bray) (derecha). Los valores de los residuales corresponden a la regresión de las variables transformadas y las unidades de Yobs-Ypred son logarítmicas. Eje X ajustado según Warton *et al.* (2006).

particularmente a concentraciones bajas de P, por lo que la estimación del NC es más confiable en términos estadísticos. Además, este método permitió determinar un IC de P Bray, con un nivel de confianza del 95 %, con límite inferior y superior de 15,8 y 20,1 mg kg⁻¹, respectivamente. Resultados coincidentes en el NC fueron recientemente reportados para pasturas de alfalfa implantadas en Argiudoles ácuicos de Entre Ríos (Pautasso y Barbagelata, 2017). Estos autores emplearon también el método ALCC modificado pero en suelos de textura más fina y con condiciones climáticas que diferían de las de Balcarce. A pesar de las diferencias en las características de suelo y clima, el NC (18,1 mg kg⁻¹) y el IC (14,8 - 22,1 mg kg⁻¹) fueron similares a los de este trabajo, lo que avalaría los resultados obtenidos.

El método ALCC modificado estimó el menor NC, con excepción del lineal-plateau, esta sobre estimación del NC mediante el cálculo de modelos de regresión respecto del método ALCC coincide con otros resultados (Dyson y Conyers, 2013). En esos trabajos emplearon el método para la calibración de niveles críticos de nitrógeno, P y azufre en diversos cultivos de grano en Australia. Según los resultados del presente estudio y otros (Pautasso y Barbagelata, 2017), el NC de P Bray para pasturas de alfalfa no difiere del correspondiente al cultivo de trigo (17,2 mg kg⁻¹, IC 15,2 a 19,6 mg kg⁻¹; Correndo *et al.* 2016a) y es superior al de maíz (10,8 mg kg⁻¹, IC 10,0 a 11,6; Correndo, Gutiérrez-Boem, Salvagiotti y García, 2016b). En resumen, el nivel de P Bray requerido para lograr el 90 % del rendimiento máximo en pasturas de alfalfa sería mayor al del cultivo de maíz pero similar al de trigo. Este orden en los NC, para similar nivel de RR, coincide con trabajos previos (Fixen y Grove, 1990). El menor umbral de NC determinado para alfalfa en este trabajo, y la consistencia con los obtenidos

en otras condiciones ecopedológicas, justifican realizar ajustes en la calibración e interpretación de los niveles de P Bray. El menor NC determinado por el ALCC modificado, respecto al cuadrático o logarítmico, determina para igual nivel de P Bray menores dosis de fertilización, lo cual contribuiría a incentivar la difusión de esta práctica en una amplia región caracterizada por muy bajas concentraciones de P en el suelo (Sainz Rozas *et al.*, 2012). Si bien en términos estrictos, la división en categorías de P Bray es válida para condiciones climáticas y edáficas similares a las empleadas en esta experiencia, la coincidencia en el NC y el IC determinados con trabajos previos (Pautasso y Barbagelata, 2017) en Entre Ríos, sugieren que sería factible extrapolar los mismos a otros ambientes de la región pampeana.

Calibración

La definición del IC de P Bray para pasturas de alfalfa, según el método de ALCC modificado (mínimo 15,8 y máximo 20,1 mg kg⁻¹), permite calificar como óptimo dicho rango de concentración, puesto que permite maximizar la producción de materia seca de alfalfa (90 % de RR). En este rango, la probabilidad de respuesta al agregado de P es solo marginal (10 %, Tabla 2) y cuestionable en términos económicos (Barbazán y García, 2015). Por debajo del valor mínimo del IC y hasta 7 mg kg⁻¹, la concentración de P Bray fue calificada en primera instancia como baja y la probabilidad de incrementar el rendimiento por el agregado de P sería elevado (según el modelo ALCC modificado entre 15 y 40 %). En función de la amplitud de este rango de respuesta, se consideró conveniente dividirlo en dos subcategorías: bajo de 11 a 15,8 mg kg⁻¹ de P Bray, o sea de 15 a 27,5 % de incremento de rendimiento, y bajo menos de 7 a 11 mg kg⁻¹

de P Bray, o sea de 27,5 a 40 % de incremento de rendimiento. Por debajo de 7 mg kg⁻¹, la concentración se calificó como muy baja y la probabilidad de incrementar la producción de materia seca por fertilización sería muy elevada (>40 %). Por otra parte, cuando la concentración de P Bray fue superior al valor máximo del IC y hasta 25 mg kg⁻¹, la calificación de concentración es alta y la probabilidad de respuesta al agregado de P es menor al 5%. Entre 25 y 40 mg kg⁻¹ el rango fue calificado como muy alto y la probabilidad de respuesta al agregado de P es prácticamente nula (<1 %). Por encima de 40 mg kg⁻¹, la calificación fue excesiva puesto que podría existir riesgo de pérdida de P desde el suelo a los sistemas acuáticos (Allen, Mallarino, Klatt, Baker y Camara, 2006; Zamuner *et al.*, 2015) afectando la calidad del ambiente si se fertilizara con P (Tabla 2).

En síntesis, en la etapa de calibración se definieron siete categorías de concentración de P Bray asociadas a la probabilidad de respuesta al agregado de P y al eventual impacto ambiental por excesiva concentración de P (Tabla 2).

Interpretación

La aplicación del criterio de suficiencia se basa en la integración del resultado analítico de P Bray con la cantidad de P requerida para lograr

la respuesta en producción de MS de alfalfa por la adición de P. Esto implica aplicar la mínima cantidad de P a la siembra, que permita maximizar la rentabilidad (Mallarino, 2006). Según el método ALCC modificado, en la Tabla 3 se presentan valores de respuesta en biomasa aérea y total en función de P Bray. El incremento en MS total se ponderó por el requerimiento de P en la misma, que surge de la pendiente de la relación entre el P absorbido en planta y la producción de MS. Para ensayos realizados en Balcarce el requerimiento varió de 2 a 3 kg de P Mg⁻¹ de MS (Berardo y Marino, 2000b), valores que coinciden con lo indicado por otros autores (Meyer, Marcum, Orloff y Smierer, 2007; Marković, Štrbanović, Cvetković, Andelković y Živković, 2009). Si bien en condiciones de muy alta disponibilidad de P se produciría consumo de lujo y estos valores podrían aumentar entre 30 y 40 %, en este trabajo se considerará un requerimiento de P intermedio. De esta manera se espera situar los valores de requerimiento en una condición próxima a una disponibilidad media de P en el suelo. Asumiendo los valores de respuesta de Tabla 3 y el requerimiento de 2,5 kg P Mg⁻¹ de MS, surgen las dosis a aplicar de P. Para los contenidos más bajos de P Bray se recomienda aplicar 118 kg ha⁻¹ de SFT y las dosis disminuyen con el aumento de P Bray (Tabla 3). Según este criterio, solo se recomienda fertilizar cuando los

Tabla 2: Calibración de P Bray para pasturas de alfalfa en Argiudoles. Se indica probabilidad de respuesta a P y tipo de fertilización en función del método ALCC modificado.

P Bray (mg kg ⁻¹)	Rendimiento relativo (%)	Calibración	Probabilidad de respuesta a P	Tipo de fertilización
<7	<60	Muy bajo	Muy elevada	Construcción Suficiencia
7 – 11	60 – 72,5	Bajo menos	Elevada	Construcción Suficiencia
11,1 - 15,7	72,5- 85	Bajo	Elevada	Construcción Suficiencia
15,8 – 20,1	85 - 92,5	Optimo	Marginal	Construcción
20,2 - 25	92,5 – 95	Alto	No	No
25,1 - 40	> 95	Muy alto	No	No
> 40	> 95	Excesivo	No	No

Tabla 3: Recomendación de fertilización fosfatada para pasturas de alfalfa según el criterio de suficiencia en función del P Bray en Argiudoles. Se indica la respuesta probable en materia seca (MS) aérea y total (aérea + raíces). SFT: superfosfato triple de calcio.

P Bray (mg kg ⁻¹)	Respuesta (Mg MS aérea ha ⁻¹)	Respuesta (Mg MS total ha ⁻¹)	Recomendación de P (kg ha ⁻¹)	Recomendación de SFT (kg ha ⁻¹)
5	7,0	9,8	23,6	118
7,5	5,4	7,6	18,2	91
10	4,2	5,9	14,2	71
12,5	3,0	4,2	10,1	51
15	2,0	2,8	6,8	34
20	0,2	0,3	No	No

valores de P Bray están por debajo del NC y al minimizar la dosis se corre el riesgo de pérdida de rendimiento por no aplicar suficiente P (Mallarino, 2012). Este criterio sería el más aconsejado cuando la ocupación de la tierra es por períodos de tiempo acotados (por ejemplo, arrendamiento de corto plazo) y es el criterio más empleado para cultivos en Argentina (Barbazán y García, 2015). El riesgo de la estricta aplicación de este criterio es que se puede no cubrir la exportación del nutriente del sistema y generar balances negativos de P en el suelo. Por esta razón, en este trabajo se consideró no solo el requerimiento de P para el incremento en biomasa aérea, sino también de MS en el sistema radical (35 %). Como se mencionó, esta estimación es cuestionable, particularmente en condiciones desfavorables para el crecimiento como déficit hídrico o épocas frías, puesto que la alfalfa prioriza la partición a raíces (Erice, Louahlia, Irigoyen, Sanchez-Diaz y Avice, 2010). Disponer de información sobre la cantidad de P acumulado en raíces, permitirá mejorar la estimación propuesta.

El mayor inconveniente de este criterio radica en que no permite considerar el nivel de producción de la pastura en forma directa, lo que afecta significativamente la demanda de P y, en consecuencia, el balance de P en el suelo a largo plazo. Para el segundo año de producción de la pastura y subsiguientes, la aplicación del criterio de suficiencia requiere realizar periódicos análisis de P Bray y refertilizar, en ese caso al voleo, de acuerdo al resultado del mismo según se indica en la Tabla 3. Como se mencionó, la recomendación es independiente del destino de la pastura (pastoreo o corte para confección de reservas), puesto que no contempla el balance de P en el suelo, sino que se basa en la determinación periódica del P Bray. El conocimiento del nivel de producción y la evolución del P Bray en el segundo y tercer año de implantada la pastura, permitirá hacer ajustes de las dosis a aplicar por refertilización según lo propuesto en la Tabla 3 (Simpson *et al.*, 2011).

La aplicación del criterio de construcción y mantenimiento para el rango muy bajo de P Bray define dosis de fertilizante que permitirán subir y mantener el nivel de P del suelo hasta el NC en un período de dos a cuatro años (Mallarino, 2006; Simpson *et al.*, 2011). La dosis surge de la integración del rendimiento objetivo, de la respuesta a P, del requerimiento de P ($2,5 \text{ kg P Mg}^{-1}$) y del P Bray. El rendimiento objetivo se define como aquel factible de ser obtenido en condiciones de clima y manejo normales de producción. En este criterio se considera la cantidad de P asignado a la biomasa aérea, por ser el producto potencialmente exportable del sistema. La

producción de MS varía en función de una gran cantidad de factores climáticos, de suelo y manejo, pero puede sintetizarse en un amplio rango de producción con un mínimo de $7,5$ y un máximo de 20 Mg MS ha^{-1} (Cangiano, 2011; Basigalup, 2007; Sevilla y Agnusdei, 2016). La amplitud del rango mencionado enfatiza la importancia de una correcta definición del nivel de producción de la pastura. Además, se debe adicionar la cantidad de P necesaria para incrementar el contenido de P del suelo para que, en un período preestablecido (por ejemplo, de cuatro a cinco años), se logre alcanzar el NC de P Bray. Para Argiudoles de la región pampeana se han determinado requerimientos muy variables (4 a 20 kg de P) para incrementar un mg kg^{-1} de P Bray (Berardo y Marino, 2000a; Ciampitti, García, Picone y Rubio, 2011; Wyngaard *et al.*, 2012; Rubio *et al.*, 2013; Pautasso y Barbagelata, 2017), dependiendo entre otros factores del contenido de P del suelo, de la textura y de la exportación de P por el cultivo o la pasturas. No obstante ello, considerando la escasa capacidad de fijación de P de los suelos del sudeste bonaerense es razonable considerar un único valor de 6 kg P para incrementar un mg kg^{-1} de P Bray (Wyngaard *et al.*, 2012). Para pasturas de alfalfa, sería acertado aumentar 2 mg kg^{-1} de P Bray por año (Tabla 4), o sea que a la demanda de P para la alfalfa se deberían adicionar 12 kg P ha^{-1} para incrementar el P del suelo. En síntesis, cuando el P Bray es muy bajo (menos de 7 mg kg^{-1} de P Bray) y la producción objetivo se establece en 8 a 15 Mg MS ha^{-1} , la aplicación del criterio de construcción y mantenimiento define dosis que variaron de 160 a 248 kg ha^{-1} de SFT, respectivamente (Figura 7).

Para los restantes rangos de P Bray, la magnitud de la respuesta a P será menor y para ponderar este efecto se determinó un factor de respuesta en

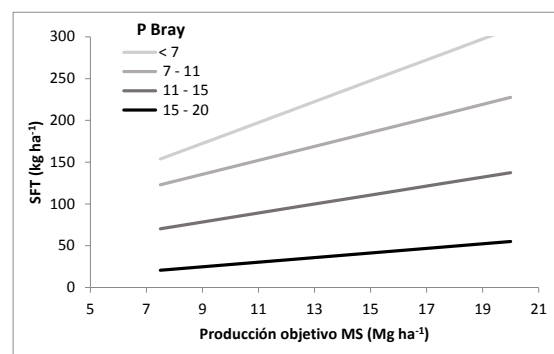


Figura 7: Recomendación de fertilización de pasturas de alfalfa según el criterio de reconstrucción y mantenimiento en función de la producción objetivo y el P Bray en Argiudoles. SFT: superfosfato triple de calcio.

Tabla 4: Rendimiento relativo, respuesta promedio y factor de respuesta en pasturas de alfalfa para rangos de P Bray definidos con el modelo ALCC modificado. Enriquecimiento anual de P Bray para dichos rangos.

Rango de P Bray	P Bray (mg kg ⁻¹)	Rendimiento relativo promedio (%)	Respuesta promedio (%)	Factor de respuesta (%)	Enriquecimiento de P (mg kg ⁻¹ año ⁻¹)
Muy bajo	< 7	48	52	1	2
Bajo menos	7 – 11	65	35	0,67	2
Bajo	11 – 15	77,5	22,5	0,43	1
Óptimo	15 - 20	88,75	11,25	0,22	0

función del modelo definido por el método ALCC modificado. Este método permite determinar el RR y por lo tanto la respuesta para los contenidos de P Bray (Tabla 4). La respuesta en producción de MS es máxima cuando el rango de P Bray es muy bajo y para esta situación se definió un factor de respuesta máxima e igual a 1. Para los rangos bajo y óptimo de concentración de P Bray el factor de respuesta se calcula de manera proporcional a aquel (Tabla 4) y permite determinar dosis menores de fertilizante para los mismos (Figura 7).

Para igual contenido de P Bray, el criterio de reconstrucción y mantenimiento (Figura 7), genera dosis de fertilización mayores que el de suficiencia (Tabla 3) y es aplicable en suelos que no fijan P. Al igual que en las planicies de EE. UU. (Dodd y Mallarino, 2005), la mayoría de los Argiudoles de la región pampeana no presentan propiedades químicas y mineralógicas que transformen significativamente el P de los fertilizantes en formas no disponibles. El P es retenido en el suelo, pero esto no significa fijación en formas no disponibles para las plantas. Aunque generalmente se menciona que entre 20 y el 30% del P aplicado es absorbido en el primer año de la aplicación, el resto se convierte en formas disponibles en años subsiguientes, lo que implica un efecto residual de al menos tres o cuatro años (Wyngaard *et al.*, 2012). Otra consecuencia relevante en suelos con poca capacidad de fijación de P, es que los métodos de colocación de los fertilizantes fosfatados (localizado, en bandas o voleo) o los productos que mejoran la eficiencia de uso de P (por ejemplo, polímeros para recubrir los fertilizantes) no mejoran en la práctica la captación de dicho nutriente (Berardo, Marino y Ehrh, 2007; Mallarino, 2012; Barbieri, Sainz Rozas, Covacevich y Echeverría, 2014; Zamuner *et al.*, 2014). La baja capacidad de fijación de P en los Argiudoles no solo justifica el efecto residual de P, sino que además avala la práctica de la refertilización al voleo con SFT o fertilizantes similares.

Para el segundo y tercer año de la pastura, y para poder continuar con el enriquecimiento de P del suelo, si el destino de la producción es el corte y la cosecha mecánica de forraje, la dosis

de fertilizante deberá ser la misma que se aplicó el primer año (Figura 7). Pero si la utilización del forraje es bajo pastoreo, se deberá reducir la dosis del primer año en un 30%. Esta diferencia radica en la disminución de la exportación de P cuando el destino del forraje fuese el consumo por pastoreo (Simpson *et al.*, 2011). La producción de 1000 kg de carne exporta tan solo 7 kg P ha⁻¹ (Block *et al.*, 2004; Alfaro *et al.*, 2009). De todos modos y para ambas alternativas de manejo, el monitoreo del nivel de P Bray al tercer o cuarto año de implantada la pastura, permitirá hacer ajustes de las dosis a aplicar por refertilización propuestas en la Figura 7.

Para finalizar es válido reiterar que la decisión por el criterio de suficiencia o de reconstrucción y mantenimiento depende de cuestiones particulares de cada situación productiva como el tipo de sistema de producción, el costo de oportunidad, las relaciones de precios, régimen de tenencia de la tierra, etc. (Simpson *et al.*, 2011; Weaver y Wong, 2011; Barbazán y García, 2015). Además, las dosis que surgen de estos criterios difieren en algunos casos de manera significativa y por ello en la práctica también serían válidas alternativas intermedias (Simpson *et al.*, 2011; Mallarino, 2012; Barbazán y García, 2015). De todos modos, el éxito del criterio escogido estará condicionado por el conocimiento agronómico del sistema de producción. Las dosis de fertilización sugeridas son susceptibles de mejora, en función de resultados experimentales o monitoreos planificados con tal objetivo. El contar con guías para determinar la dosis de fertilización y refertilización permitirá efectuar un uso racional de los fertilizantes fosfatados y contribuir a la sostenibilidad del recurso suelo y a la sustentabilidad de los sistemas productivos.

CONCLUSIONES

Para pasturas de alfalfa en suelos Argiudoles, el método de ALCC modificado permitió explicar mayor porcentaje de la variación entre el RR y el P Bray que los métodos logarítmico, cuadrático, lineal-plateau y cuadrático-plateau. Estos modelos

no cumplen con el supuesto de homogeneidad de varianza, característica que sí cumple el ALCC modificado, por lo que la estimación del NC de este método es estadística y agronómicamente más confiable. El NC de P Bray requerido para lograr el 90% del rendimiento máximo en pasturas de alfalfa es de 18,1 mg kg⁻¹. Con base en este método se calibró la concentración de P Bray en siete categorías y se confeccionaron guías para determinar la dosis de fertilización y refertilización de pasturas de alfalfa integrando los requerimientos de la misma con la oferta de P Bray, según los criterios de suficiencia y de reconstrucción y mantenimiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración del Dr. Adrián Correndo quien proporcionó el programa en Excel para correr el modelo ALCC modificado, como así también los comentarios sobre los alcances del mismo. Además, se agradecen las sugerencias del Dr. Nahuel Reussi Calvo sobre el manuscrito del trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, M., Salazar, F. S., Oenema, O., Iraira, S., Teuber, N., Ramírez, L. y Villarroel, D. (2009). Nutrient balances in beef cattle production systems and their implications for the environment. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 9 (1), 40-54.
- Allen, B. L., Mallarino, A. P., Klatt, J. G., Baker, J. L. y Camara, M. (2006). Soil and surface runoff phosphorus relationships for five typical USA Midwest soils. *Journal of Environmental Quality*, 35, 599-610.
- Alvarez, R. (2008). Problemas en el uso del rendimiento relativo como variable respuesta de redes experimentales de fertilización. En *Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. San Luis, Argentina.
- Anglade, J., Billen, G. y Garnier, J. (2015). Relationships for estimating N₂ fixation in legumes: incidence for N balance of legume-based cropping systems in Europe. *Ecosphere*, 6 (3), 37. <http://dx.doi.org/10.1890/ES14-00353.1>
- Barbazán, M. y García F. O. (2015). Evaluación de la fertilidad y recomendaciones de fertilización. En Echeverría, H. E. y García, F. O. (Eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos* (379-399), Buenos Aires, Argentina: Ediciones INTA.
- Barbieri, P. A., Sainz Rozas, H. R., Covacevich, F. y Echeverría, H. E. (2014). Phosphorus placement effects on phosphorous recovery efficiency and grain yield of wheat under no-tillage in the humid pampas of Argentina. *International Journal of Agronomy*. Vol. 2014, 12. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/507105>.
- Basigalup, D. H. y Rossanigo, R. (2007). Capítulo 1. Panorama actual de la alfalfa en la Argentina. En: *El cultivo de la alfalfa en la Argentina*. Basigalup, D.H. (Ed.), 15-24. Obtenido de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-el_cultivo_de_la_alfalfa_en_la_argentina.pdf
- Berardo, A. y Marino, M. A. (2000a). Efecto de la fertilización fosfatada sobre la disponibilidad de P y su relación con la producción de forraje en molisoles del sudeste bonaerense. II Alfalfa. *Actas XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Mar del Plata, Argentina.
- Berardo, A. y Marino M. A. (2000b). Producción de forraje de alfalfa bajo diferentes niveles de nutrición fosfatada en el sudeste bonaerense. *Revista Argentina de Producción Animal*, 20 (2), 93-101.
- Berardo, A., Marino, M. A. y Erht, S. (2007). Producción de forraje de alfalfa con aplicación de fósforo superficial y profunda. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA)*, 36 (1), 97-114.
- Block, H. C., Erickson, J. E. y Klopfenstein, T. J. (2004). Review: Re-evaluation of phosphorus requirements and phosphorus retention of feedlot cattle. *Faculty Papers and Publications in Animal Science*, 756. <http://digitalcommons.unl.edu/animalscifacpub/756>.
- Bray, R. H. y Kurtz, L. (1945). Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59, 39-45.
- Brown, H. E., Moot, D. J. y Teixeira, E. I. (2006). Radiation use efficiency and biomass partitioning of Lucerne (*Medicago sativa*) in a temperate climate. *European Journal of Agronomy*, 25, 319-327. doi:10.1016/j.eja.2006.06.008
- Cade-Menun, B. J., Doody, D. G., Liu, C.W. y Watson, C. J. (2017). Long-term changes in grassland soil phosphorus with fertilizer application and withdrawal. *Journal of Environmental Quality*, 46, 537-545. doi:10.2134/jeq2016.09.0373
- Cangiano, C. (2011). Capítulo 6. Rendimiento y persistencia de cultivares. En: Cangiano, C. A. (Ed.) *Manual de alfalfa* (2ª edición 2011). Buenos Aires, Argentina, Ediciones INTA.
- Cerrato M. E., Blackmer, A. M. (1990). Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agronomy Journal*, 82, 138-143.
- Ciampitti, I. A., García, F. O., Picone, L. I. y Rubio, G. (2011). Phosphorus: balance and soil extractable dynamics in field crops rotations in Pampean soils. *Soil Science Society of America Journal*, 75 (1), 131-142. doi:10.2136/sssaj2009.0345

- Correndo, A. A. y García, F. O. (2017). Métodos de diagnóstico nutricional en cultivos extensivos en Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 26, 3-12.
- Correndo, A. A., Gutiérrez-Boem, F. H., Salvagiotti, F. y García, F. O. (2016a). The modified arcsine-logarithm methodology for analyzing soil test-relative yield relationships. *ASA-CSSA-SSSA Meeting*. Phoenix, Arizona, EE. UU.
- Correndo, A. A.; Gutiérrez-Boem, F. H.; Salvagiotti, F. y García, F. O. (2016b). Método alternativo para estimar niveles críticos de nutrientes. *XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Río Cuarto, Córdoba, 27 junio al 1 de julio de 2016*
- Correndo, A. A., Salvagiotti, F., García, F. O. y Gutiérrez-Boem, F. H. (2017a). A modification of the arcsine-log calibration curve for analysing soil test value-relative yield relationships. *Crop & Pasture Science*, 68(3), 297-304. doi.org/10.1071/CP16444
- Correndo, A. A., Salvagiotti, F., García, F. O. y Gutiérrez-Boem, F. H. (2017b). Modified ALCC Excel Tool. (v3. xlsx). [Software de cómputo]. Buenos Aires, Argentina. International PlantNutritionInstitute. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/317953836_Modified_ALCC_Excel_Tool
- Dahnke, W. C. y Olson, R. A. (1990). Soil test correlation, calibration and recommendation. En Westerman, R. L. (Ed.). *Soil testing and plant analysis. Soil Science Society of America Book Series N°3*. Madison, Wisconsin, EE.UU.: SSSA. P. 45-71.
- Díaz Zorita, M. y Gambaudo, S. (2007). Capítulo 11. Fertilización y encalado en alfalfa. En: Basigalup, D. H. (Ed.). *El Cultivo de la Alfalfa en la Argentina*. Buenos Aires, Argentina: Ediciones INTA. 229-244.
- Dodd, J. R. y Mallarino, A. P. (2005). Soil-test phosphorus and crop grain yield responses to long-term phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 1118-1128.
- Dyson, C. B. y Conyers, M. K. (2013). Methodology for online biometric analysis of soil test-crop response datasets. *Crop & Pasture Science*, 64, 435-441. doi.org/10.1071/CP13009
- Echeverría, H. E. y García, F. O. (1998). Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. *Boletín Técnico 149*. Buenos Aires, Argentina: Est. Exp. Agrop. INTA Balcarce. P. 18.
- Erice, G., Louahlia, S., Irigoyen, J. J., Sanchez-Díaz, M. y Avicé, J. C. (2010). Biomass partitioning, morphology and water status of four alfalfa genotypes submitted to progressive drought and subsequent recovery. *Journal of Plant Physiology* 167, 114-120. doi:10.1016/j.jplph.2009.07.016
- Fixen, P. E. y Grove, J. H. (1990). Testing soil for phosphorus. En Westerman, R. L. (Ed.). *Soil testing and plant analysis. Soil Science Society of America Book Series N°3*. Madison, Wisconsin, EE. UU.: SSSA. P. 141-180.
- García, F. O., Picone, L. I. y Ciampitti, I. A. (2015). Capítulo 8: Fósforo. En Echeverría, H. E. y García, F. O. (Eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Buenos Aires, Argentina: Ediciones INTA. P. 229-264.
- Havlin, J., Beaton, J., Tisdale, S. y Nelson, W. (2005). *Soil Fertility and Fertilizers (7ª edición)*. Upper Saddle River, New Jersey, EE.UU.: Pearson Education Inc.
- Khaiti, M. y Lemaire, G. (1992). Dynamics of shoot and root growth of Lucerne after seeding and after cutting. *European Journal of Agronomy*, 1, 241-247.
- Mallarino, A. P. (2006). Criterios de fertilización fosfatada en sistemas de agricultura continua con maíz y soja en el cinturón del maíz. *Revista Fertilizar*, 5, 10-20.
- Mallarino, A. P. (2012). Nutrient management for increased crop productivity and reduced environmental impacts. *Actas XIX Congreso Latinoamericano - XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACs-SLCS, Mar del Plata, Argentina.
- Marković, J., Štrbanović, R., Cvetković, M., Anđelković, B. y Živković, B. (2009). Effects of growth stage on the mineral concentrations in alfalfa (*Medicago sativa* L.) Leaf, stem and the whole plant. *Biotechnology in Animal Husbandry*, 25 (5-6), 1225-1231.
- Meyer, R.D., Marcum, D.B., Orloff, S.B. y Smierer, J.L. (2007). Chapter 6. Alfalfa fertilization strategies. En: Summers, C. G. y Puttnam, D. H. (Eds.). *Irrigated alfalfa management for Mediterranean and desert zones*. Oakland, California, EE.UU.: University of California. Division of Agriculture and Natural Resource. Publication 8292. 12/2007. <http://anrcatalog.ucdavis.edu>.
- Pagani, A., Echeverría, H. E., Sainz Rozas, H. R. y Barbieri, P. A. (2008). Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 26 (2), 183-193. ISSN 0326-3169 (impreso), 1850-2067 (electrónico). http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_26n2/26-2%20Pagani.pdf
- 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.
- Quintero, C., Boschetti, N y Benavidez, R. (1995). Fertilización fosfatada de pasturas en implantación en suelos de Entre Ríos. *Ciencia del Suelo*, 13, 60-65.
- Ron, M.M. (2003). Calibración de análisis de suelos. Niveles y paradigmas. *Informaciones Agronómicas*, 17 (marzo), 13-16.
- Rubio, G., Micucci, F. y García, F. O. (2013). Capítulo 14: Ciclado de nutrientes y fertilización de pasturas.

- En: *Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Facultad de Agronomía. UBA. ISBN 978-987-27793-7-5: 263-292.
- Sainz Rozas, H. R., Echeverría, H. E. y Angelini, H. P. (2012). Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y Extrapampeana argentina. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA)*, 38, 33-39.
- Sevilla, G. y Agnusdei, M. G. (2016). Efecto del agregado de fósforo y nitrógeno en el crecimiento de cultivos de alfalfa en rebrotes de primavera y verano en un suelo vertisol de Entre Ríos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA)*, 42 (1), 93-101.
- Simpson, R. J., Oberson, A., Culvenor, R. A., Ryan, M. H., Veneklaas, E. J., Lambers, H., Lynch, J. P., Ryan, P. R., Delhaize, E., Smith, F. A., Smith, S. E., Harvey, P. R. y Richardson, A. E. (2011). Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use efficiency of farming systems. *Plant Soil*, 349, 89-120. doi: 10.1007/s11104-011-0880-1.
- Warton, D. I., Wright, I. J., Falster, D. S. y Westoby, M. (2006). Bivariate line-fitting methods for allometry. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 81, 259-291. doi:10.1017/S1464793106007007
- Weaver, D. M. y Wong, M. T. F. (2011). Scope to improve phosphorus (P) management and balance efficiency of crop and pasture soils with contrasting P status and buffering indices. *Plant and Soil*, 349, 37-54.
- Wyngaard, N., Sainz Rozas, H. R., Echeverría H. E., Divito, G. A. (2012). Long-term fertilization and tillage: effect on soil properties and maize yield in a southern pampas Argiudoll. *Soil & Tillage Research*, 119, 22-30. ISSN: 0167-1987. doi: 10.1016/j.still.2011.12.002.
- Zamuner, E. C., Lloveras, J. y Echeverría, H. E. (2015). Métodos agronómicos y ambientales de determinación de fósforo en Argiudoles del sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 33(1), 55-63.
- Zamuner, E. C., Alejandro, A., Giletto, C. M., Lloveras, J. y Echeverría, H. E. (2014). Fertilización en papa: evaluación del agregado de un polímero al superfosfato. *XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Bahía Blanca, Argentina.