

Umbral de requerimiento de fósforo en suelos Argiúdoles y guía para la fertilización de alfalfa (*Medicago sativa* L.)

María Alejandra Marino^{1,*} y Hernán Eduardo Echeverría¹

- Para alfalfa, la leguminosa forrajera más importante de la región pampeana argentina, se recalibró la relación entre la producción de materia seca y el fósforo (P) en el suelo.
- Con el umbral obtenido (18 mg kg⁻¹ de P-Bray) se calibraron siete categorías de P-Bray y se confeccionaron guías para la fertilización y refertilización de alfalfa según el criterio de suficiencia, y de construcción y mantenimiento.
- Estas guías de fertilización permitirán un uso más racional de los fertilizantes fosfatados en pasturas de alfalfa.

Introducción

La alfalfa (*Medicago sativa* L.) es la leguminosa forrajera más importante para la producción de carne y leche en la región pampeana argentina, ocupando 4.7 millones de ha. Además, su participación en las rotaciones es valorada debido a su capacidad para incorporar nitrógeno al suelo a través de la fijación biológica (Basigalup, 2007). Los potenciales de producción de forraje en la época primavera-estivo-otoño se acercan a las 20 t ha⁻¹ año⁻¹, sin embargo las producciones logradas suelen ser inferiores debido en parte al efecto ocasionado por la deficiencias de nutrientes. En general, la disponibilidad de fósforo (P) en los suelos de la región (Sainz Rozas et al., 2012) resulta insuficiente para abastecer la demanda de pasturas de alfalfa de alta producción, por lo que la fertilización fosfatada es una práctica recomendada (Berardo y Marino, 2000). La aplicación de P en cantidades inadecuadas - ya sea por defecto (ganadería extensiva) o por exceso (ganadería intensiva) - ocasiona perjuicios productivos y ambientales (Weaver y Wong, 2011). Para decidir la aplicación de P se han desarrollado métodos de diagnóstico basados en el análisis de muestras de suelo (García et al., 2015).

El desarrollo de un método de diagnóstico de P requiere cumplir tres etapas: correlación, calibración e interpretación (Dahnke y Olson, 1990). En la primera se determina la asociación entre la producción de forraje (materia seca, MS) y la cantidad de P extraída por un determinado análisis de suelo. Para los suelos de la región pampeana, el método más empleado para estimar la disponibilidad de P para las plantas se basa en el extractante de Bray y Kurtz (1945). En esta etapa se determina el valor umbral (U) de P-Bray para distinguir entre sitios con y sin respuesta a la fertilización con P. Esto se ha realizado con varias ecuaciones matemáticas cuyos valores de U no son coincidentes y, por no cumplir con algunos supuestos, presentan falta de robustez y confiabilidad estadística (Marino y Echeverría, 2018). Para evitar estos inconvenientes, se desarrolló el método de la curva de calibración arcoseno-logaritmo ALCC (Dyson y

Conyers, 2013) que cumple con los supuestos estadísticos. Además, la modificación efectuada por Correndo et al. (2017a), incorpora un componente de error que permite determinar el intervalo de confianza (IC) del U. Estos autores concluyen que el método ALCC modificado resulta una alternativa superadora para la estimación del U de P-Bray respecto a los otros métodos tradicionales. En la etapa de calibración se debe establecer la probabilidad de respuesta a la fertilización con P y calificar de manera cualitativa el resultado cuantitativo del análisis de suelo. Por último, en la etapa de interpretación se debe determinar la dosis de fertilizante a agregar para lograr el rendimiento objetivo, según el criterio de suficiencia o de construcción-mantenimiento (Mallarino, 2006). El criterio de suficiencia establece que existe respuesta significativa al agregado de P solo cuando el nivel de P-Bray es inferior al U y la dosis de fertilización fosfatada se determina buscando maximizar la eficiencia agronómica y el retorno de la inversión en fertilizante. Por su parte, el criterio de construcción y mantenimiento establece la necesidad de fertilización no sólo para maximizar el rendimiento, sino para incrementar el valor de P-Bray del suelo hasta un nivel óptimo en un plazo determinado (Mallarino, 2006).

En ensayos de fertilización fosfatada de alfalfa en el sudeste bonaerense se registraron respuestas significativas en la producción de MS. Un modelo exponencial permitió describir la relación entre el contenido de P-Bray y la producción de MS en Argiúdoles. Según este modelo, la máxima producción de MS se alcanzó con contenidos de P-Bray entre 25 y 30 mg P kg⁻¹ (Berardo y Marino, 2000). Otros autores mencionan umbrales similares para suelos de Entre Ríos (Quintero et al., 1995). 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 lo señalado por Fixen y Grove (1990). En la actualidad se busca desarrollar estrategias de fertilización que permitan satisfacer la demanda de los cultivos y lograr el mayor beneficio productivo y económico minimizando el impacto ambiental (Cade-Menun et al., 2017).

¹ Unidad Integrada Facultad de Ciencias Agrarias de la 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

* Autor de contacto. Correo electrónico: marino.mariaa@inta.gob.ar

Se plantea determinar el U y el IC de P-Bray para la producción de MS de alfalfa en Argiudoles del sudeste bonaerense aplicando el método ALCC modificado, y confeccionar una guía de fertilización fosfatada para alfalfa que integre los requerimientos de la pastura con la oferta de P-Bray del suelo. Se espera mejorar la eficiencia de utilización de los fertilizantes fosfatados y, en sentido amplio, la sustentabilidad de los sistemas productivos.

Materiales y métodos

Resultados de experimentación con fertilización fosfatada en alfalfa, fueron obtenidos en la Unidad Integrada FCA - EEA INTA Balcarce (37° 45' Lat. Sur, 58° 18' Long. Oeste) en un suelo Argiudol típico con 10.3 mg kg⁻¹ de P, pH 6.2, y 6.4% de materia orgánica (Berardo y Marino, 2000). 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: 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 una 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, 46% de P₂O₅ o 20% de P). Se utilizó un diseño en bloques completamente aleatorizados con tres repeticiones por lo que se implementaron quince unidades experimentales (unidad experimental 2 x 6 m).

Las precipitaciones anuales variaron desde 636 mm a 945 mm (**Figura 1A**), pero en el periodo de mayor crecimiento de alfalfa (octubre a marzo), las precipitaciones fueron semejantes entre años y cercanas al promedio histórico (654 mm) (**Figura 1A**). Por su parte, la temperatura media del aire durante los periodos experimentales fueron menos variables que las precipitaciones y semejantes al promedio histórico (**Figura 1B**).

La producción anual de MS en 1995/96, 1996/97, 1997/98 y 1998/99 (cuatro cosechas por año efectuadas durante el periodo de crecimiento primavera-estivo-otoño), 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) para cada unidad experimental y por año (acumulando los cuatro cortes) para las tres primeras campañas como:

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

En otoño de cada año y para cada unidad experimental se extrajeron muestras de suelo (0 a 20 cm) para determinar el contenido de P (P-Bray).

El efecto de la fertilización fosfatada sobre la disponibilidad de P en el suelo y su relación con la producción de MS

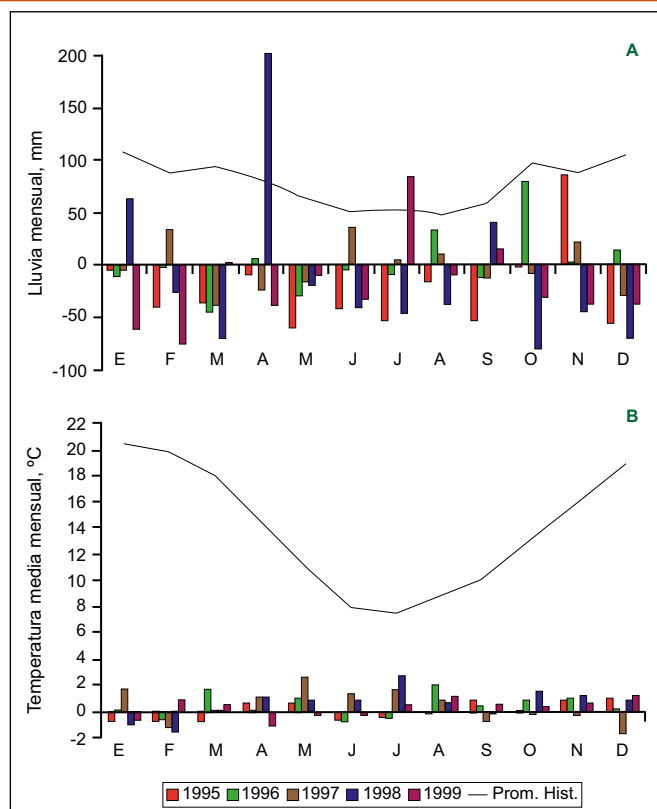


Figura 1. Desvíos de la lluvia mensual (barras) en mm (arriba) y desvíos de la temperatura diaria media mensual (barras) en °C (abajo) para 1995, 1996, 1997, 1998, y 1999 con respecto a los valores promedios históricos de 45 años (líneas llenas) para Balcarce. Fuente: Agrometeorología EEA INTA Balcarce.

(expresada en términos de RR) fueron descriptos con el método ALCC modificado, para lo cual se relacionó el valor de RR en función del nivel de P-Bray.

El método ALCC (Dyson y Conyers, 2013), se estimó según una modificación al modelo original (Correndo et al., 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 (ArcoSeno RR) y se centraron los valores de X al 90% de RR de manera de obtener el U como parámetro de una función lineal. Para ello se estimó una regresión lineal bivariada por el método de ejes principales estandarizados (SMA):

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

El valor de a es el ln U, que como está expresado en unidades logarítmicas, es necesario re-transformar 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 U, con un nivel de confianza de 95%. El método ALCC se ajustó con paquete Excel (Correndo et al., 2017b) y 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 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 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 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 categoría de concentración de P-Bray excesiva que considera la posibilidad de pérdida de P por escurrimiento (Alfaro et al., 2009).

En la etapa de interpretación se siguieron los criterios de suficiencia y de construcción y mantenimiento.

1) Criterio de suficiencia

Se generaron recomendaciones de fertilización a partir de la relación entre la producción anual de forraje (RR) y el contenido de P-Bray en suelo según ALCC modificado. La respuesta relativa se expresó en MS y para estimar la demanda de P para la biomasa total de alfalfa, se consideró un incremento del 35% en concepto de biomasa de raíces (Khaiti y Lemaire, 1992). La respuesta en MS total se ponderó por el requerimiento de 2.5 kg de P por tonelada de MS. Este valor es la pendiente de la relación entre MS y P acumulado en la biomasa de alfalfa. Para expresar la recomendación en superfosfato triple de calcio (SFT, 0-20-0), la dosis de P se deberá multiplicar por 5. 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.

2) Criterio de construcción y mantenimiento

Para el criterio de construcción y mantenimiento en primera instancia se deberá definir la producción de MS objetivo, que es la factible de ser obtenida sin deficiencia de P en condiciones de clima y manejo normales de producción. Cuando la categoría de P-Bray se encuentra en el IC, se fertilizará con la cantidad de P suficiente como para reponer el 50% de la MS objetivo de producción, ponderada por el requerimiento de P (2.5 kg de P por tonelada de MS). Según Baudracco et al. (2011), la eficiencia de cosecha bajo pastoreo, promedio regional para pasturas de alfalfa, es de 50% de la MS producida. Cuando el contenido de P-Bray es menor al IC, además de reponer el P exportado del sistema se deberá adicionar la cantidad de P necesaria para incrementar el contenido de P del suelo como para que en un periodo de cuatro años se logre llegar al U de P-Bray (18 mg kg⁻¹). De esta forma, para las categorías < 6, 6 a 9, 9 a 12 y 12 a 15 mg kg⁻¹, el incremento en P debería ser de 3, 2.25, 1.5 y 0.75 mg kg⁻¹ por año, respectivamente. Considerando la escasa capacidad de fijación de P de los suelos Argiudoles del sudeste bonaerense, se consideró un valor de 6 kg P ha⁻¹ para incrementar un mg kg⁻¹ de P-Bray (Wyngaard et al., 2012).

Para el criterio de construcción y mantenimiento la cantidad de fertilizante fosfatado a aplicar en el segundo y tercer año, dependerá del 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. Pero si el destino del forraje es el pastoreo, se debería reducir en un 30% la dosis del primer año por la menor exportación de P del sistema.

Resultados y discusión

La aplicación de 100 kg P ha⁻¹ incrementó ($P < 0.05$) la producción de forraje en 101, 72, 51 y 45% en el primero, segundo, tercer y cuarto año, respectivamente (**Tabla 1**) (Berardo y Marino, 2000). 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 refertilización anual (**Tabla 1**). Estas producciones concuerdan y aún superan a las obtenidas en otras zonas productoras (Quintero et al., 1995; Cangiano, 2002).

Correlación

El método ALCC modificado (Correndo et al., 2017b), permitió explicar el 87% de la variación del RR de alfalfa en función del contenido de P-Bray, lo que permitiría estimar la respuesta relativa de la pastura al agregado de P (**Figura 2**). Según este método, el U para lograr 90% del RR fue de 18 mg kg⁻¹ de P-Bray. A diferencia de los métodos de regresión habitualmente utilizados, el ALCC modificado presenta un aceptable grado de dispersión de los residuos, particularmente a concentraciones bajas de P (Marino y Echeverría, 2018), por lo que la estimación del U es más confiable en términos estadísticos (**Figura 2**). 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 de P-Bray, respectivamente. Resultados coincidentes en el U fueron 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 difieren de las de Balcarce. A pesar de las diferencias en las

Tabla 1. Producción anual de materia seca de alfalfa en función de las dosis de P aplicado.

Dosis P	1º año	2º año	3º año	4º año
	-----kg ha ⁻¹ -----			
0	10 047 c	9 105 c	7 599 c	8 212 b
25	14 267 b	11 792 bc	9 144 bc	10 001 b
50	16 000 b	12 905 ab	9 316 bc	9 049 b
100	20 240 a	15 620 a	11 454 ab	11 929 ab
50+100	---	14 973 ba	14 406 a	15 324 a

Valores seguidos por diferentes letras dentro de cada año indican diferencias significativas entre tratamientos. Test de Duncan ($P = 0.05$).

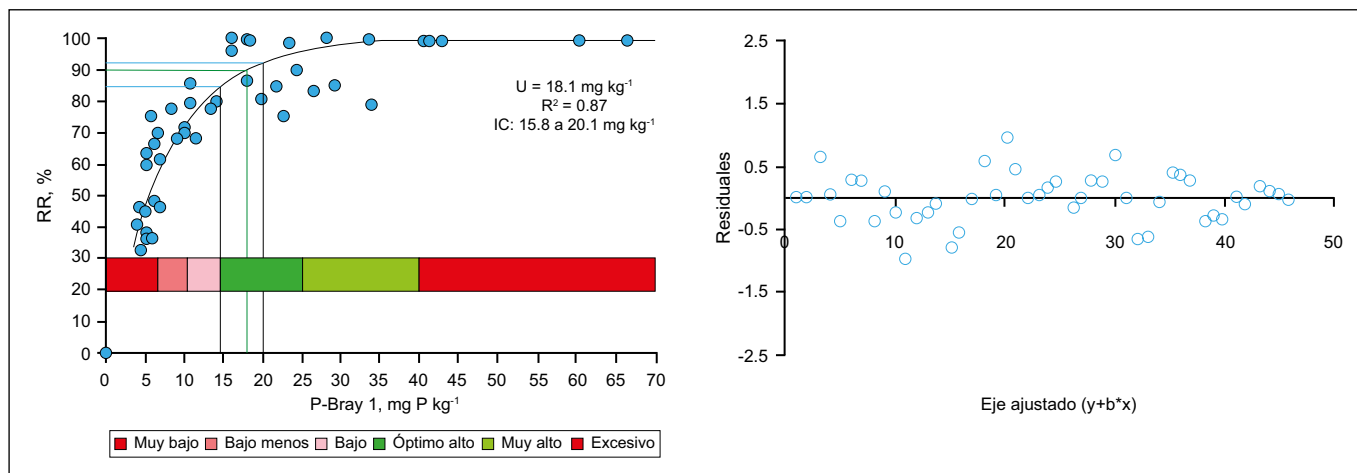


Figura 2. Umbral (U, línea vertical verde), intervalo de confianza (IC, líneas verticales negras) y coeficiente de regresión (R^2) entre el rendimiento relativo (RR) de alfalfa y el fósforo Bray en el suelo (P-Bray) según el método ALCC modificado. Los valores de los residuales corresponden a la regresión de las variables transformadas y las unidades de Yobs-Ypred son logarítmicas. Eje X ajustado según (Warton et al., 2006). La barra de colores indica las categorías de concentración de P-Bray.

características de suelo y clima, el U (18 mg kg^{-1}) y el IC ($14.8 - 22.1 \text{ mg kg}^{-1}$) fueron similares a los de este trabajo, lo que avalaría los resultados obtenidos.

El método ALCC modificado estimó un menor U que los métodos de ajuste usados anteriormente, esta sobre estimación del U mediante el cálculo con modelos de regresión respecto del método ALCC coincide con lo reportado por Dyson y Conyers (2013). Según los resultados del presente estudio y los de Pautasso y Barbagelata (2017), el U 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., 2016) y es superior al de soja (10.5 mg kg^{-1} , IC 9.6 a 11.4) y al de maíz (9.9 mg kg^{-1} , IC 9.1 a 10.9) (Correndo et al., 2018) (Figura 3). Esto coincide con lo señalado por Fixen y Grove (1990). El menor U determinado por el ALCC modificado respecto a los métodos de ajuste usados anteriormente justifica realizar ajustes en la calibración e interpretación de los niveles de P-Bray. Esto sugiere que para igual nivel de P-Bray se requieren 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 U y el IC determinados por Pautasso y Barbagelata (2017), 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 dicho rango la probabilidad de respuesta al agregado de P es solo marginal (10%, Figura 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 elevada (según el modelo ALCC 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 respuesta en rendimiento, y bajo menos de 7 a 11 mg kg^{-1} de P-Bray o sea de 27.5% a 40% de respuesta en rendimiento. Por debajo de 7 mg kg^{-1} , la concentración se calificó como muy baja y la respuesta 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 respuesta al agregado de P sería menor al 5%. Entre 25 y 40 mg kg^{-1} el rango fue calificada como muy alto y la respuesta a 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 (Zamuner et al., 2015), afectando la calidad del ambiente si se fertilizara con P (Figura 2).

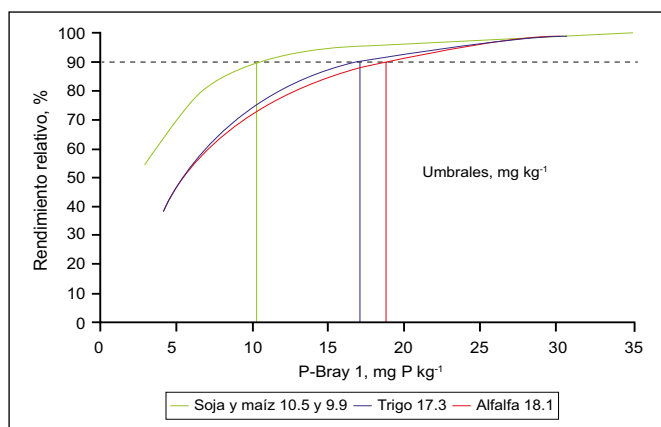


Figura 3. Umbrales críticos de P-Bray para cultivos de soja y maíz (línea verde, Correndo et al., 2018), trigo (línea azul, Correndo et al., 2016) y alfalfa (línea roja, Marino y Echeverría, 2018).

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 su excesiva concentración (**Figura 2**).

Interpretación

La producción de MS de alfalfa varía en función de factores climáticos, edáficos y de manejo en un amplio rango con valores de 10 a 20 t MS ha⁻¹ (Cangiano, 2002; Basigalup, 2007), por lo que la correcta definición del objetivo de producción es clave para un acertado diagnóstico de requerimiento de P. Según lo determinado por el método ALCC, el P-Bray determina el RR de la alfalfa (**Figura 2**) y a su vez permite estimar la respuesta relativa a la fertilización con P como la diferencia al 90% de RR (**Tabla 2**). Como es lógico, la respuesta relativa disminuye con el incremento en el P-Bray del suelo. La respuesta en producción de MS sigue igual tendencia y se incrementa a medida que aumenta el objetivo de rendimiento de la pastura de alfalfa. Una vez determinada la respuesta en MS de alfalfa, la aplicación del criterio de suficiencia para estimar la dosis de P considera un incremento del 35% en MS por la biomasa de raíces (Khaiti y Lemaire, 1992) y un requerimiento de 2.5 kg P Mg⁻¹ de MS. En la **Figura 4** se observa que la dosis de SFT aumenta con la cantidad de MS objetivo de producción y disminuye con el aumento en el contenido de P-Bray. Según este criterio, solo se recomienda fertilizar cuando los valores de P-Bray están por debajo del U e implica aplicar la mínima cantidad de P a la siembra, que permita maximizar la rentabilidad (Mallarino, 2006). El criterio de suficiencia puede conducir al agregado de cantidades que no cubran la exportación del nutriente en el sistema y generar balances negativos de P en el suelo.

Para el criterio de construcción y mantenimiento y para contenidos de P-Bray en el IC, se considerará la MS consumida (50% del objetivo de producción) y el requerimiento de P (2.5 kg de P por tonelada de MS). En la medida que los contenidos de P-Bray disminuyen, se deberá incrementar las dosis de P como para que en 4 años se logre aumentar el P-Bray del suelo hasta el valor U (18 mg kg⁻¹). El aumento será de 3, 2.25, 1.5 y 0.75 mg kg⁻¹ de P por año, para las categorías de P-Bray < 6, 6 a 9, 9.1 a 12 y 12.1 a 15 mg kg⁻¹, respectivamente. Para ello

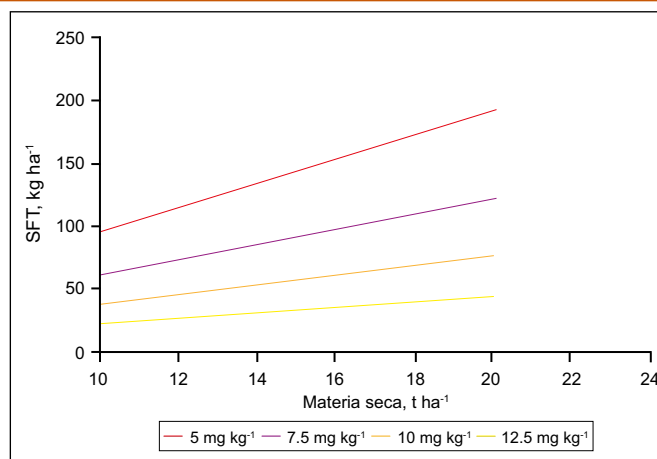


Figura 4. Recomendación de fertilización fosfatada de pasturas de alfalfa según el criterio de suficiencia en función del objetivo de producción de materia seca y el P-Bray en Argiúdoles. SFT: superfosfato triple de calcio.

se deberá agregar 6 kg P por mg de P-Bray (Wyngaard et al., 2012). En la **Figura 5A** se observa que las dosis de SFT para igual producción objetivo de MS son superiores según el criterio de construcción y mantenimiento en relación al de suficiencia (**Figura 4**). La diferencia en las dosis disminuye con el aumento de P-Bray y con la disminución de la MS objetivo.

El criterio de construcción y mantenimiento es aplicable en suelos que no fijan P, como los de la región pampeana y las planicies de EE.UU. (Dodd y Mallarino, 2005). La mayoría de estos suelos no presentan propiedades 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 - 30% del P del fertilizante 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 3 ó 4 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) no mejoran en la práctica la captación de dicho nutriente (Berardo et al., 2007; Barbieri et al., 2014). La baja capacidad de fijación de P en los Argiúdoles

Tabla 2. Rendimiento relativo (RR) y respuesta relativa según el método ALCC y respuesta en materia seca (MS) para distinta producción objetivo de alfalfa según el P-Bray en Argiúdoles.

P-Bray mg kg ⁻¹	RR %	Respuesta relativa %	-- Respuesta en MS para producción objetivo de: --		
			12 t ha ⁻¹	15 t ha ⁻¹	18 t ha ⁻¹
			----- kg ha ⁻¹ -----		
5	46	44	5280	6600	7920
7.5	62	28	3360	4200	5040
10	72.5	17.5	2040	2550	3060
12.5	80	10	1200	1500	1800
15	85	5	600	750	900
20	90	0	0	0	0

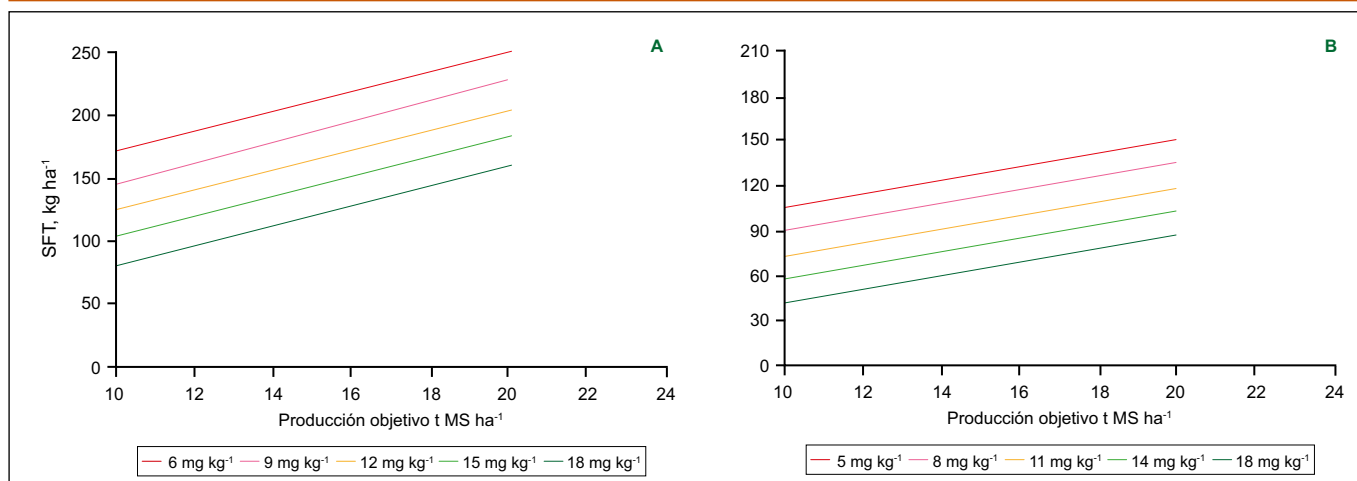


Figura 5. Recomendación de fertilización (A) y de refertilización (B) fosfatada de pasturas de alfalfa según el criterio de construcción y mantenimiento en función del objetivo de producción de materia seca (MS) y el P-Bray en Argiudoles. SFT: Superfosfato triple de calcio.

no solo justifica el efecto residual de P, sino que además justifica la práctica de la refertilización al voleo con SFT o fertilizantes similares.

Para el segundo y tercer año de producción de la pastura, si el destino es el corte y la cosecha mecánica de forraje la dosis de fertilizante deberá ser la misma que se aplicó el primer año según el criterio de construcción y mantenimiento (**Figura 5A**). Pero si la utilización del forraje es bajo pastoreo, se deberá reducir la dosis del primer año en aproximadamente 30% (**Figura 5B**). Esta diferencia radica en la disminución de la exportación de P cuando el destino del forraje fuese el consumo por pastoreo 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 (Simpson et al., 2011), y b) el retorno de P al suelo a través de las deyecciones (Alfaro et al., 2009). Esto reduce la exportación de P del sistema y permite disminuir las dosis a aplicar. Es válido recordar que la producción de 1000 kg de carne exporta tan solo 7 kg P ha⁻¹ (Alfaro et al., 2009). De todos modos, 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. Es válido reiterar que el

criterio de suficiencia optimiza la eficiencia agronómica y el retorno de la inversión en fertilizante. Por su parte, el criterio de construcción y mantenimiento asegura lograr el máximo rendimiento y a su vez incrementa el valor de P-Bray del suelo (Mallarino, 2006).

Para finalizar la decisión por el criterio de suficiencia o de construcción 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, el régimen de tenencia de la tierra, etc. (Simpson et al., 2011). 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. De todos modos, 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 U de P-Bray en el suelo requerido para lograr el 90% del rendimiento

Ejemplos de estimación de recomendación de fertilización

1) Criterio de suficiencia

- Rendimiento objetivo de 16 t MS y nivel de P-Bray de 5 mg kg⁻¹.
- La respuesta relativa es del 44% o sea 7 t MS.
- A esta respuesta en MS aérea, se suma un incremento de 35% para cubrir el desarrollo de raíces (7 t * 0.35 = 2.45 t MS). El total de MS sería de 9.45 t MS.
- Considerando una demanda de 2.5 kg P por t MS, se recomendarían 23.6 kg P o sea 118 kg SFT.

2) Criterio de construcción y mantenimiento

- Rendimiento objetivo de 16 t MS bajo pastoreo y suelo de P-Bray de 11 mg kg⁻¹.
- La reposición del P para mantenimiento es de 14 kg P (16 t MS * 50% eficiencia de cosecha * 2.5 kg P t⁻¹ * 70% eficiencia de pastoreo).
- Para construir el P-Bray de 11 a 18 mg kg⁻¹, en el primer año se considera una aplicación de P de como para subir 1.5 mg kg⁻¹ por año, es decir una aplicación de 9 kg P ha⁻¹ (1.5 mg kg⁻¹ * 6 kg P por mg kg⁻¹).
- El total a aplicar sería de 23 kg P ha⁻¹ (14 kg P de mantenimiento + 9 kg P de construcción), o sea unos 115 kg SFT.

máximo es de 18 mg kg⁻¹. En base a esto se calibró la concentración de P-Bray y se confeccionaron guías para determinar la dosis de fertilización y refertilización de pasturas de alfalfa según los criterios de suficiencia y de construcción y mantenimiento.

Agradecimiento

Al Ing. Agr. M. Sc. Adrián Correndo quien proporcionó el programa en Excel para correr el método ALCC modificado, como así también los comentarios sobre los alcances del mismo.

Bibliografía

- Alfaro, M., F.S. Salazar, O. Oenema, S. Iraira, N. Teuber, L. Ramirez, y D. Villarroel. 2009. Nutrient balances in beef cattle production systems and their implications for the environment. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 9(1):40-54.
- Barbazán, M., y F.O. García. 2015. Evaluación de la fertilidad y recomendaciones de fertilización. pp. 379-399. En: H.E. Echeverría, y F.O. García (eds.). En *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. 904 p.
- Barbieri, P.A., H.R. Sainz Rozas, F. Covacevich, y H.E. Echeverría. 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*. 2014, 12 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/507105>
- Basigalup, D.H. 2007. El cultivo de la alfalfa en la Argentina. Ed. Daniel H. Basigalup Buenos Aires: Ediciones INTA. 479 p.
- Baudracco, J., N. López Villalobos, L.A. Romero, D. Scandolo, M. Maciel, E.A. Comeron, C.W. Holmes, y T.N. Barry. 2011. Effects of stocking ratio on pasture production, milk production and reproduction of supplemented crossbred Holstein-Yersey dairy cows grazing lucerne pasture. *Animal Feed Science and Technology*. 168:131-143.
- Berardo, A., y M.A. Marino. 2000. Producción de forraje de alfalfa bajo diferentes niveles de nutrición fosfatada en el sudeste bonaerense. *Rev. Arg. de Prod. Anim.* 20(2):93-101.
- Berardo, A., M.A. Marino, y S. Erht. 2007. Producción de forraje de alfalfa con aplicación de fósforo superficial y profunda. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA)*, 36(1):97-114.
- Bray, R.H., y L. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*. 59:39-45.
- Cade-Menun, B.J., D.G. Doody, C.W. Liu, y C.J. Watson. 2017. Long-term changes in grassland soil phosphorus with fertilizer application and withdrawal. *J. Environ. Qual.* 46:537-545 (2017). doi:10.2134/jeq2016.09.0373.
- Cangiano, C. 2002. Capítulo 6. Rendimiento y persistencia de cultivares. En: *Manual de alfalfa*. 2da impresión 2011. Ed. Carlos A. Cangiano. Ediciones INTA. CD. ISBN 987-521-058-7.
- Correndo, A.A., F.H. Gutiérrez-Boem, F. Salvagiotti, y F.O. García. 2016. The modified arcsine-logarithm methodology for analyzing soil test–relative yield relationships. Phoenix, AZ, EE.UU., 2016 ASA-CSSA-SSSA Meeting.
- Correndo, A.A., F. Salvagiotti, F.O. García, y F.H. Gutiérrez-Boem. 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., F. Salvagiotti, F.O. García, y F.H. Gutiérrez-Boem. 2017b. https://www.researchgate.net/publication/317953836_Modified_ALCC_Excel_Tool
- Correndo, A.A., F. Salvagiotti, F.O. García, y F.H. Gutiérrez-Boem. 2018. Recalibración de umbrales críticos de P-Bray para maíz y soja en Argentina. CLAP 2018. I Congreso Latinoamericano de Agricultura de Precisión. 11-13 de Abril, 2018. Santiago, Chile. DOI: 10.13140/RG.2.2.28706.73922.
- Dahnke, W.C., y R.A. Olson. 1990. Soil test correlation, calibration and recommendation. p. 45-71. In R.L. Westerman (ed.). *Soil testing and plant analysis*. Soil Science Society of America Book Series N°3. SSSA, Madison, WI.
- Dodd, J.R., y A.P. Mallarino. 2005. Soil-test phosphorus and crop grain yield responses to long-term phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:1118-1128.
- 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. doi.org/10.1071/CP13009 .
- Fixen, P.E., y J.H. Grove. 1990. Testing soil for phosphorus. p. 141-180. In R.L. Westerman (ed.). *Soil testing and plant analysis*. Soil Science Society of America Book Series N°3. SSSA, Madison, WI.
- García, F.O., L.I. Picone, e I.A. Ciampitti. 2015. Capítulo 8: Fósforo. pp. 229-264. En: H.E. Echeverría, y F.O. García (eds.). En *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. 904 p.
- Khaiti, M., y G. Lemaire. 1992. Dynamics of shoot and root growth of Lucerne after seeding and after cutting. *Eur. J. Agron.* 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. Fertilizar Asociación Civil. Buenos Aires, Argentina.
- Marino, M.A., y H.E. Echeverría. 2018. Diagnóstico de requerimiento de fósforo para alfalfa (*Medicago sativa* L.) en Argiudoles. *Agriscientia Vol* 35:11-24.
- Pautasso, J.M., y P.A. Barbagelata. 2017. Actualización del umbral de fósforo Bray para el cultivo de alfalfa en Entre Ríos (Argentina). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 26:13-16. [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.f/0/8865252DFED837860325815D00631784/\\$FILE/13.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.f/0/8865252DFED837860325815D00631784/$FILE/13.pdf)
- Quintero, C., N. Boschetti, y R. Benavidez. 1995. Fertilización fosfatada de pasturas en implantación en suelos de Entre Ríos. *Ciencia del Suelo* 13:60-65.
- Sainz Rozas, H.R., H.E. Echeverría, y H.P. Angelini. 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región pampeana y extra pampeana argentina. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA)*. 38:33-39.
- Simpson, R.J., A. Oberson, R.A. Culvenor, M.H. Ryan, E.J. Veneklaas, H. Lambers, J.P. Lynch, P.R. Ryan, E. Delhaize, F.A. Smith, S.E. Smith, P.R. Harvey, y A.E. Richardson. 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 M.T.E. Wong. 2011. Scope to improve phosphorus (P) management and balance efficiency of crop and pasture soils with contrasting P status and buffering indices. *Plant Soil*. 349:37-54
- Wyngaard, N., H.R. Sainz Rozas, H.E. Echeverría, y G.A. Divito. 2012. Fertilization and tillage effects 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., J. Lloveras, y H.E. Echeverría. 2015. Métodos agrónomicos y ambientales de determinación de fósforo en Argiudoles del sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 33(1):55-63. ♦