

1. Introducción y metodología general

Quincke, A.¹; Bermúdez, R.²; Cuadro, R.³; Giorello, D.³

La competitividad de la producción de carne y leche de Uruguay se basa en gran medida en la rentabilidad del sistema pastoril. A su vez, es ampliamente conocido que se necesita contar con especies leguminosas forrajeras para aumentar la producción de forraje, tanto en cantidad como en calidad, y así lograr intensificar la producción pecuaria (MGAP, 1987). Sin embargo, los suelos del Uruguay son naturalmente deficientes en su capacidad de suministro de fósforo (P) (Morón, 2008, Barbazán *et al.*, 2007) y, por lo tanto, el fertilizante fosfatado es un insumo central en pasturas a base de leguminosas. Por ello, la fertilización fosfatada es un pilar fundamental en la productividad ganadera. Además, en condiciones de alta producción de forraje en base a leguminosas, el azufre (S) también puede ser limitante. Por ejemplo esto ha sido comprobado para el caso de trébol blanco en Nueva Zelanda (Sinclair *et al.*, 1996) y para el caso de Uruguay también hay estudios que muestran la potencial deficiencia de S en esta especie (Morón, 2008).

ANTECEDENTES

Una primera síntesis de la información generada sobre fertilización de pasturas con P en el país fue presentada en la “Guía de Fertilización de Pasturas” de 1976 por Castro *et al.*, pertenecientes a la Estación Experimental La Estanzuela (Centro de Investigaciones Agrícolas “Alberto Boerger”). Originalmente fue una publicación mimeografiada y finalmente se publicó formalmente en 1981 (Castro *et al.*, 1981). Dicha Guía de Fertilización se basó en el método de análisis de resinas de intercambio catiónico para determinar el P disponible o extractable en el suelo, toman-

do la muestra a una profundidad de 0-15 cm. Estos autores recomiendan el manejo de la fertilización fosfatada tomando en cuenta tres parámetros: el equivalente fertilizante (EF), la tasa de descenso (TD) y los niveles mínimos y máximos de P extractable recomendados. Estos niveles se definieron como orientación para lograr una buena implantación y sobrevivencia de las leguminosas, y hasta un 90% del rendimiento máximo alcanzable. Además, reconociendo la variabilidad edáfica de los suelos de Uruguay desde el punto de vista de la dinámica del P, los autores propusieron las siguientes tres categorías de suelos: el Grupo I, comprendiendo suelos de textura pesada con pH mayor a 5.7, como Brunosoles éutricos y Vertisoles sobre Libertad, Fray Bentos, Basalto, etc.; el Grupo II, incluyendo suelos de textura media con pH entre 5.5 y 6.0, como Brunosoles subéutricos y Litosoles sobre Cristalino, Argisoles sobre Cretáceo sur, etc.; y el Grupo III, de suelos de textura liviana con pH menor 5.6, como Argisoles y Planosoles de Tacuarembó, Cretáceo, Yaguarí, etc. En estudios previos a la Guía de 1976, Zamuz y Castro (1974) y luego Zamalvide *et al.* (1978) evaluaron diferentes métodos para determinar la disponibilidad de P en distintos suelos y con fuentes de P contrastantes.

Luego de la Guía de 1976 se sucedieron diversos trabajos que proveyeron nueva información, con la cual se propusieron ajustes y se realizaron revisiones (Mallarino y Casanova, 1984; Morón, 1984). Estos trabajos también permitieron concluir que el método Bray I se adapta a la mayoría de los suelos de uso agrícola del país, además de que es un método muy aceptado a nivel mundial. Como resultado, el método Bray I es el mé-

¹ Ing. Agr. PhD., Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA La Estanzuela.

² Ing. Agr. MPhil., hasta 2015 Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA Treinta y Tres.

³ Ing. Agr., Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA Tacuarembó.

todo más comúnmente utilizado en nuestro país (Bordoli, 2003). Sin embargo, también se fueron reportando problemas con los métodos de análisis, tanto con el Bray I, como con el de resinas. Por ejemplo, para el caso de Basalto, Morón (2007) determinó que luego de un año de fertilizar con fosforita o con superfosfato triple, el P extractable por el método de resinas era más alto que los niveles esperables según la Guía de 1976. Por otro lado, en un suelo de Cristalino en Cerro Colorado, Morón (2007) observó que el P extractable por el método de resinas era más bajo que lo esperable según la Guía de 1976, es decir opuesto al caso de Basalto. También Bordoli (2003) concluye que el método Bray I requeriría una calibración diferente para suelos arenosos y suelos con alta actividad de carbonato de calcio. Para suelos formados sobre Basalto el método Bray I ha mostrado baja sensibilidad para detectar diferencias en disponibilidad, indicando que este método no se adaptaría a este tipo de suelos (Bordoli, 2003).

El manejo de la fertilización fosfatada también implica la elección del tipo de fertilizante o "fuente" de P a utilizar. La fosforita natural (FN) o roca fosfórica es la materia prima para producir fertilizantes solubles (como los superfosfatos), y por lo tanto su precio es generalmente menor que el de estos últimos. Como contraparte, el P de la fosforita natural no está disponible en forma inmediata, haciendo que en muchos estudios de respuesta vegetal se observe una menor eficiencia para este tipo de fuente en comparación con fuentes solubles (Bolan *et al.*, 1990; Zapata y Roy, 2007). Este aspecto, conocido como la eficiencia relativa de la fosforita, ha sido objeto de extensos estudios, puesto que depende no sólo de las propiedades intrínsecas de la propia roca fosfórica, sino también de las propiedades del suelo, de las especies en cuestión, etc. (Khasawneh y Doll, 1978). Existe una alta variabilidad entre las fosforitas desde el punto de vista de un uso directo como fertilizante (Rajan *et al.*, 1996). En Uruguay se han realizado varios estudios evaluando fosforita natural, resultando en valores de eficiencia relativa respecto a los

fertilizantes solubles del tipo superfosfatos que oscilan entre 52 y 142% (Morón, 1982; Bermúdez *et al.*, 2000; Risso *et al.*, 2002; Ayala y Bermúdez, 2008).

En sistemas agropecuarios de mayor intensificación productiva; que implican altas tasas de extracción de nutrientes, y con un componente importante de leguminosas en las mezclas forrajeras; el azufre (S) es otro nutriente que podría estar limitando la producción (Morón, 1996a; Zamalvide, 1995). El S es esencial para las plantas y, en el caso particular de las leguminosas, cumple un rol específico vinculado a la fijación biológica de nitrógeno (Scherer y Lange, 1996; Krusell *et al.*, 2005). A nivel nacional existen antecedentes que indican que en cultivos forrajeros comerciales pueden ocurrir niveles subóptimos de S, tanto en pasturas de trébol blanco (Morón, 2008), como de *Lotus corniculatus* (Barbazán *et al.*, 2007). Estos resultados son coincidentes con estudios anteriores de respuesta al S realizados con pasturas de alfalfa (Zamalvide, 1998).

De los párrafos precedentes se desprende que la fertilización fosfatada de pasturas ha sido objeto de estudio de intensos esfuerzos de investigación de distintos grupos. Por otra parte, varios autores nacionales han revisado y resumido la trayectoria de experimentación e investigación sobre el tema (Morón, 2007; Bordoli, 2007). En general, se reconoce que las pautas y recomendaciones vigentes presentan limitantes para implementar un adecuado manejo de la fertilización fosfatada en forma generalizada a nivel de país.

Entre los años 2008 y 2012 se llevó a cabo una red de experimentos de fertilización fosfatada de pasturas, ubicados sobre diversos suelos de las principales zonas pecuarias del país, y que fueron instalados y manejados con un protocolo común de evaluaciones. Durante el trabajo experimental, a partir del año 2010 se hicieron jornadas de campo y de presentación de resultados preliminares (INIA, 2010). La presente publicación tiene como objetivo presentar y discutir los resultados de dicha red.

Objetivos experimentales

El presente trabajo experimental sobre fertilización de pasturas se realizó con el objetivo general de generar una nueva guía de fertilización de pasturas a nivel nacional. De acuerdo con los párrafos precedentes, esto refiere a comprender distintos tipos de suelos, las interacciones con los dos tipos de fuentes de P (solubles o fosforita), y el uso de distintos métodos para P disponible. Los objetivos específicos se abordan en distintos capítulos de la presente publicación, según el siguiente esquema:

- Ajustar niveles críticos de P extractable para dos especies contrastantes (capítulo 2).
- Determinar el equivalente fertilizante para distintos suelos y según fuentes de fertilizantes (capítulo 3).

- Determinar la eficiencia relativa de la fosforita respecto a una fuente de P soluble (capítulo 4).
- Determinar la influencia del exceso de agua sobre el P extractable (capítulo 5)
- Estudiar la respuesta al agregado de S en diferentes suelos (capítulo 6).

Suelos estudiados

Los experimentos fueron realizados en 14 sitios ubicados sobre diversos suelos de las principales zonas pecuarias del país (Figura 1.1 y Cuadro 1.1). Las principales características edáficas de los sitios de la red están resumidos en los Cuadros 1.2 y 1.3, para las profundidades 0–7,5 y 0–15 cm respectivamente. Los experimentos fueron instalados en 2008 y 2009, y finalizaron en 2012.



Figura 1.1. Mapa de ubicación de los sitios experimentales de la Red de Fertilización de Pasturas.

Cuadro 1.1. Identificación y características edáficas de los sitios experimentales de la Red de Fertilización de Pasturas.

Nombre sitio	Zona agroecológica	Tipo de Suelos	Unidad de suelos*	Material generador	Grupo CONEAT*	Coordenadas GPS
La Carolina	Sedimentos /Cristalino	Brunosol Éútrico Vértico	La Carolina	Sedimentos cuaternarios sobre Cristalino	10.12	Lat -33.87998 Long -57.10597
Trinidad	Sedimentos gravillosos /Cristalino	Brunosol Subéútrico	Isla Mala	Sedimentos con gravillas sobre Cristalino	10.3; 5.4	Lat -33.52172 Long -56.87801
Florida	Cristalino	Brunosol Dútrico Háptico	San Gabriel-Guaycurú	Cristalino	5.02b	Lat -33.99887 Long -56.14657
Pan de Azúcar	Sierras rocosas del Este	Inceptisol	Sierra de Aiguá, Sierra de Ánimas	Cristalino	2.11a	Lat -34.79154 Long -55.15398
Palo a Pique	Lomadas del Este	Brunosol Subéútrico Lúvico	Alférez	Sedimentos poco espesos y gravillosos sobre Cristalino	10.7	Lat -33.25417 Long -54.49833
Isla Patrulla	Sierras no rocosas del Este	Luvisol	Cerro Chato, Bañado del Oro	Sedimentos con gravillas sobre Cristalino alterado	2.13; 2.20	Lat -33.09735 Long -54.54290
Tres Puentes	Noreste	Brunosol Subéútrico	Tres Puentes	Sedimentos Pelíticos Grises	6.13	Lat -31.44953 Long -55.23330
Rincón	Bajos del Este	Planosol Subéútrico	Río Branco	Sedimentos limo arcillosos	3.52	Lat -32.79931 Long -53.65478
Sauce Cañote	Bajos del Noreste	Planosol Dútrico	Río Tacuarembó	Sedimentos	G03.21	Lat -31.791826 Long -55.65260
Tambores	Basalto profundo	Brunosol Éútrico Vértico	Itapebí - Tres Árboles	Sedimentos limo arcillosos sobre Basalto	12.11; 12.21	Lat -31.891505 Long -56.20270
Glencoe	Basalto profundo	Vertisol Háptico	Itapebí - Tres Árboles	Sedimentos limo arcillosos sobre Basalto	12.11; 12.21	Lat -32.014596 Long -57.15160
Ombúes	Litoral Oeste /Libertad	Vertisol Típico	Risso, Libertad	Sedimentos cuaternarios	10.1; 10.8b; parte de 10.5	Lat -33.90608 Long -57.83110
Young	Litoral Oeste /Fray Bentos	Brunosol Éútrico Vértico	Young, Bequeló	Sedimentos cuaternarios sobre Fray Bentos	11.5; 11.6; parte de 11.4	Lat -32.68285 Long -57.64666
Palmitas	Litoral Oeste /Cretáceo	Brunosol Subéútrico	Cuchilla del Corralito	Sedimentos arenosos sobre Cretáceo	9.5	Lat -33.60221 Long -57.77142

* Unidad de Suelos según la Carta de Reconocimiento de Suelos 1:1 millón (MAP/DSF, 1976).
Grupo CONEAT según MGAP (1979).

Cuadro 1.2. Propiedades físico-químicas de los suelos en muestras tomadas a 0-7,5 cm de profundidad en cada sitio de la Red de Fertilización de Pasturas.

Sitio	pH	Carbono Orgánico	Nitrógeno total	Arena	Limo	Arcilla	P-Bray I	P-Resinas	P-Cítrico
		----- % -----				----- mg P/ kg -----			
La Carolina	5,8	2,8	0,3	39	36	25	1,7	1,7	3,0
Trinidad	6,2	2,0	0,2	51	27	22	3,2	1,4	3,0
Florida	5,8	1,4	0,2	59	25	16	1,5	1,1	2,0
Pan de Azúcar	5,6	2,0	0,2	44	38	18	1,0	1,5	2,0
Palo a Pique	5,4	1,9	0,2	42	40	19	2,1	1,9	4,0
Isla Patrulla	5,4	2,3	0,2	26	42	33	1,2	1,3	1,0
Tres Puentes	5,5	1,9	0,2	34	40	25	1,9	0,8	3,0
Rincón	5,6	1,8	0,2	39	40	21	6,7	6,5	7,0
Sauce Cañote	5,8	1,1	0,1	52	29	21	3,5	3,7	5,0
Tambores	5,7	3,6	0,3	33	37	30	4,9	5,4	6,0
Glencoe	6,1	4,5	0,4	29	36	35	2,1	1,6	4,0
Ombúes	6,7	2,4	0,2	29	37	34	9,7	20,8	16,0
Young	6,0	2,6	0,3	50	25	25	4,0	3,7	5,0
Palmitas	5,8	1,8	0,2	51	22	28	10,1	10,6	10,0

Sitio	Bases intercambiables				Ac.Tit.	CIC pH7	Bases totales	Al int.	% Sat. bases
	Ca	Mg	K	Na					
	----- meq / 100 g -----							%	
La Carolina	16,8	4,0	0,6	0,3	4,9	26,4	21,5		79,7
Trinidad	8,6	3,8	0,3	0,3	4,4	17,3	12,9		73,5
Florida	3,2	2,3	0,5	0,2	3,3	9,5	6,1		64,0
Pan de Azúcar	5,3	3,8	0,7	0,3	4,0	14,1	10,1		67,7
Palo a Pique	5,0	2,6	0,2	0,3	4,3	12,5	8,1		63,6
Isla Patrulla	4,3	3,0	0,7	0,2	5,7	13,9	8,2	0,1	59,8
Tres Puentes	7,0	2,4	0,5	0,4	4,2	14,4	10,3		68,8
Rincón	6,1	2,6	0,3	0,2	3,8	12,9	9,2		70,8
Sauce Cañote	5,6	1,7	0,2	0,3	4,5	12,2	7,8		61,3
Tambores	14,4	8,7	0,4	0,4	6,8	30,7	23,9		76,1
Glencoe	24,6	9,5	0,5	0,4	3,1	38,3	35,2		91,2
Ombúes	24,3	5,4	0,5	0,4	2,0	33,0	31,0		91,8
Young	18,9	3,2	0,5	0,3	4,5	27,4	22,9		83,8
Palmitas	13,9	3,3	0,4	0,1	3,5	21,3	17,8		83,2

Cuadro 1.3. Propiedades físico-químicas de los suelos en muestras tomadas a 0–15 cm de profundidad en cada sitio de la Red de Fertilización de Pasturas

Sitio	pH	Carbono Orgánico	Nitrógeno total	Arena	Limo	Arcilla	P-Bray I	P-Resinas	P-Cítrico
		----- % -----				----- mg P/ kg -----			
La Carolina	5,8	2,8	0,3	39	36	25	1,7	1,7	3,0
Trinidad	6,2	2,0	0,2	51	27	22	3,2	1,4	3,0
Florida	5,8	1,4	0,2	59	25	16	1,5	1,1	2,0
Pan de Azúcar	5,6	2,0	0,2	44	38	18	1,0	1,5	2,0
Palo a Pique	5,4	1,9	0,2	42	40	19	2,1	1,9	4,0
Isla Patrulla	5,4	2,3	0,2	26	42	33	1,2	1,3	1,0
Tres Puentes	5,5	1,9	0,2	34	40	25	1,9	0,8	3,0
Rincón	5,6	1,8	0,2	39	40	21	6,7	6,5	7,0
Sauce Cañote	5,8	1,1	0,1	52	29	21	3,5	3,7	5,0
Tambores	5,7	3,6	0,3	33	37	30	4,9	5,4	6,0
Glencoe	6,1	4,5	0,4	29	36	35	2,1	1,6	4,0
Ombúes	6,7	2,4	0,2	29	37	34	9,7	20,8	16,0
Young	6,0	2,6	0,3	50	25	25	4,0	3,7	5,0
Palmitas	5,8	1,8	0,2	51	22	28	10,1	10,6	10,0

Sitio	Bases intercambiables				Ac.Tit.	CIC pH7	Bases totales	Al int.	% Sat. bases
	Ca	Mg	K	Na					
	----- meq / 100 g -----							%	
La Carolina	16,8	4,0	0,6	0,3	4,9	26,4	21,5		81,5
Trinidad	8,6	3,8	0,3	0,3	4,4	17,3	12,9		74,6
Florida	3,2	2,3	0,5	0,2	3,3	9,5	6,1		64,6
Pan de Azúcar	5,3	3,8	0,7	0,3	4,0	14,1	10,1		71,5
Palo a Pique	5,0	2,6	0,2	0,3	4,3	12,5	8,1		65,1
Isla Patrulla	4,3	3,0	0,7	0,2	5,7	13,9	8,2	0,7	58,5
Tres Puentes	7,0	2,4	0,5	0,4	4,2	14,4	10,3		71,3
Rincón	6,1	2,6	0,3	0,2	3,8	12,9	9,2		70,9
Sauce Cañote	5,6	1,7	0,2	0,3	4,5	12,2	7,8		63,6
Tambores	14,4	8,7	0,4	0,4	6,8	30,7	23,9		77,8
Glencoe	24,6	9,5	0,5	0,4	3,1	38,3	35,2		91,9
Ombúes	24,3	5,4	0,5	0,4	2,0	33,0	31,0		94,0
Young	18,9	3,2	0,5	0,3	4,5	27,4	22,9		83,7
Palmitas	13,9	3,3	0,4	0,1	3,5	21,3	17,8		83,6

Brevemente, las técnicas analíticas empleadas fueron las siguientes:

- pH: en agua con potenciómetro y relación suelo-solución 1:2,5.
- Carbono orgánico y nitrógeno total: combustión seca a 900°C con equipo Leco. Para el carbono orgánico se aplicó una corrección por el factor 0,81 para reportar valores equivalentes al método tradicional de digestión húmeda de Tinsley (1967).
- Textura (% arena, limo, arcilla): método de Bouyucos (1962) sin destrucción de materia orgánica. Según Morón (com. pers.), debido a una dispersión insuficiente, esta metodología subestima la fracción arcilla (y sobreestima la fracción arena) en suelos de basalto.
- Fósforo disponible por métodos Bray I, resinas catiónicas y ácido cítrico: ver detalles más adelante y en Cuadro 1.6.
- Calcio y magnesio intercambiables: extracción con acetato de amonio 1N a pH 7 y absorción atómica.
- Potasio y sodio intercambiables: extracción con acetato de amonio 1N a pH 7 y emisión atómica.
- Acidez titulable: Extracción con acetato de calcio 1N a pH 7 y posterior titulación.
- CIC a pH 7: Ca + Mg + K + Na + acidez titulable.
- Aluminio intercambiable: Solamente para el suelo de Isla Patrulla. Extracción con KCl y posterior titulación.
- % saturación de bases: $(Ca + Mg + K + Na) * 100 / CIC$.

En relación a los niveles iniciales de P extractable, es oportuno comentar que los sitios de Ombúes y de Palmitas no reflejan los niveles naturales esperables. Si bien en todos los sitios se buscó que no hubiera habido historia de fertilización con P, es posible que estos dos sitios sí recibieron algún tipo de agregado de P. En el caso de Ombúes, posiblemente haya habido redistribución de P via deyecciones animales. En el caso de Palmitas es posible que haya habido historia de fertilización asociado a un manejo de rotación agrícola-ganadera del predio.

DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS

En cada sitio se instalaron tres experimentos, dos de ellos para estudiar las respuestas a P y uno para la respuesta a S. En todos los casos, las dimensiones de las unidades experimentales (parcelas) fueron de 2x6 m (12 m²).

Los experimentos relacionados con la respuesta y dinámica de P fueron evaluados con dos especies leguminosas: trébol blanco (*Trifolium repens* 'Estanduela Zapicán') y *Lotus corniculatus* 'San Gabriel' (de aquí en adelante lotus), conformando dos experimentos adyacentes (ensayos I y II, respectivamente). El diseño de tratamientos fue igual para ambas especies y está resumido en el Cuadro 1.4. Se utilizaron dos tipos de fertilizantes contrastantes: superfosfato triple (0-46/46-0; ST) y fosforita natural (0-10/29-0; FN) de Argelia. La composición (N-Psoluble/Ptotal-K) indica que ambos fertilizantes difieren en el contenido de P total (46% vs 29% de P₂O₅). Además difieren en el contenido de P soluble (46% vs 10% de P₂O₅), aunque dicha "solubilidad" se determina en forma diferente según el tipo de fertilizante: para fertilizantes solubles se determina la solubilidad en agua, mientras para roca fosfórica se determina en ácido cítrico al 2%. Por último, en el tratamiento N° 18 se utilizó S elemental (85% S) en polvo adquirido en droguería, que se aplicó inmediatamente después de la fosforita. Por lo tanto, el diseño experimental para los ensayos I y II corresponde a un diseño factorial incompleto en un arreglo de cuatro bloques completos al azar.

El experimento destinado a evaluar la respuesta a S fue evaluado solamente con trébol blanco y corresponde al ensayo III. El diseño de tratamientos está resumido en el Cuadro 1.5. Como fuente de S se utilizó sulfato de calcio en polvo (13%S). Esta fuente de S tiene la misma naturaleza que el yeso agrícola, excepto que este último se comercializa generalmente granulado. Además, se fertilizó con P aplicando superfosfato triple a una dosis uniforme de 120 kg P₂O₅/ha el

primer año y 30 kg P_2O_5 /ha en años subsiguientes. El diseño experimental para el ensayo III corresponde a un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones.

Instalación de los experimentos y esquema de fertilización

El manejo de preparación para la instalación de los experimentos fue realizado con aplicaciones de glifosato, con dosis y repeticiones necesarias para lograr el control total de la vegetación existente. La siembra fue realizada al voleo en cobertura, a una dosis de 5 kg/ha de semilla de trébol blanco y 15 kg/ha de lotus, según el experimento. Ambas leguminosas fueron inoculadas con cepas comerciales y peleteadas con carbonato de calcio previo a la siembra. Para asegurar stand de plantas de las leguminosas durante 4 años, y en los casos donde se consideró necesario, se realizaron resiembras anuales en los meses de otoño. También es pertinente mencionar que las condiciones de sequía del año 2008 provocaron importantes fallas de implantación en el primer año de instalación en la mayoría de los ensayos. Al año siguiente fueron resebrados, en muchos casos con máquina de siembra directa. Como consecuencia, en la mayoría de los casos no existió el rendimiento de las pasturas con las dosis de fertilizantes iniciales del primer año.

La aplicación de fertilizantes, tanto la dosis inicial como las refertilizaciones anuales,

también fueron realizadas al voleo y en cobertura en los tres experimentos. La siembra y la fertilización se realizaron en el mismo momento posterior al muestreo de suelos (en los meses de marzo-abril).

Muestreo de suelos

Todos los años, previo a las aplicaciones de refertilización, se realizaron los muestreos parcelarios de suelo. Los mismos se realizaron evitando condiciones extremas de humedad del suelo, es decir que no estuviese ni demasiado seco ni demasiado húmedo, sino cercano a capacidad de campo. Se empleó siempre un calador de tubo con control de profundidad para obtener muestras de dos profundidades: 0-7,5 y 7,5-15 cm. Se reportan resultados para la profundidad 0-15cm, que se determinó como el promedio de las dos profundidades de muestreo. Además, al momento de instalación de cada ensayo (previo a la siembra y fertilización), se obtuvieron muestras de suelo compuestas de cada bloque para la caracterización inicial. Las muestras fueron analizadas para determinar pH en agua, carbono orgánico, nitrógeno total, capacidad de intercambio catiónico, textura y P extractable. Este último fue determinado con tres métodos de extracción que se detallan más adelante. En el ensayo de respuesta a S (experimento III) se analizó también contenido de sulfatos. Los resultados de dichos análisis iniciales están resumidos en los Cuadros 1.2 y 1.3.

Cuadro 1.4. Diseño de tratamientos de los experimentos de fósforo: fuentes, dosis inicial y de refertilización anual (kg de P_2O_5 /ha) para los ensayos de trébol blanco y lotus (ensayos I y II, respectivamente).

Fuente de P	Número de Tratamiento	Dosis inicial kg P_2O_5 /ha	Dosis refertilización kg P_2O_5 /ha
Testigo	1	0	0
ST*	2	40	0
ST	3	120	0
ST	4	240	0
ST	5	40	10
ST	6	80	20
ST	7	120	30
ST	8	240	60
ST	9	360	90
FN*	10	40	0
FN	11	120	0
FN	12	240	0
FN	13	40	10
FN	14	80	20
FN	15	120	30
FN	16	240	60
FN	17	360	90
FN + S**	18	80 + 20 S**	20 + 5 S

* ST es superfosfato triple; FN es fosforita natural.

** El S aplicado en el tratamiento 18 es S elemental (S⁰), dosis en kg de S /ha.

Cuadro 1.5. Diseño de tratamientos del experimento de respuesta a azufre (S): dosis anuales de S como sulfato de calcio en trébol blanco (ensayo III).

Fuente	Número tratamiento	Dosis de S kg S /ha /año
Testigo	1	0
Sulfato de calcio	2	10
Sulfato de calcio	3	25

Métodos de fósforo extractable y de sulfatos en suelo

El P extractable fue determinado analíticamente por tres métodos: Bray I, resinas catiónicas y ácido cítrico. En el cuadro 1.6 se resumen los principales aspectos metodológicos de cada una de estas técnicas. En todos los ca-

sos, para la determinación de la concentración de P en el extracto filtrado se utiliza la técnica colorimétrica de Murphy y Riley (1962). La "medición" del color se realiza con un espectrofotómetro registrando la absorbancia en la banda de 882 nm, la cual se relaciona con la concentración de fosfato a través de una curva hecha con soluciones conocidas.

Cuadro 1.6. Principales aspectos metodológicos de las tres técnicas analíticas para determinar fósforo extractable en el presente estudio.

	Bray I (*)	Resinas catiónicas	Ácido cítrico
Solución extractante	fluoruro de amonio (NH ₄ F) 0,03N, ácido clorhídrico (HCl) 0,025N	Resinas catiónicas saturadas en H ⁺ ; 4,7g /100mL	ácido cítrico 0,5%
Relación suelo: solución extractante	3,56 g de suelo : 25 mL de solución	5 g de suelo : 50 mL de mezcla	5 g de suelo : 50 mL de solución
Tiempo de agitado	5 minutos	3 horas	30 minutos
Cita original (#)	Bray y Kurtz (1945)	Zamuz y Castro (1974)	Palermo <i>et al.</i> (1985)

Notas: * La metodología para el análisis Bray I fue modificada con posterioridad al presente estudio. Desde febrero de 2016 el laboratorio de INIA La Estanzuela utiliza una relación suelo: extractante de 2g : 20mL y los frascos se disponen horizontalmente durante agitado (en lugar de verticalmente).

En todos los casos las técnicas tuvieron ligeras modificaciones respecto a la cita original.

En los experimentos de respuesta a S (experimento III) se hizo un muestreo anual de suelos (0-7,5 y 7,5-15cm) para determinar el contenido de S como sulfatos (S-SO₄²⁻). La técnica de análisis que se usa en el Laboratorio de Suelos y Aguas de INIA La Estanzuela es una extracción con fosfato monocalcico según Cantarella y Prochnow (2001). En esta técnica, la relación suelo: solución extractora es de 10: 25, el tiempo de agitado es de 30 minutos y la determinación es por colorimetría (con BaCl₂, en la banda de 420nm). Según Jones (1986) este método de extracción permite estimar en forma satisfactoria la disponibilidad de S para las plantas, en virtud de que extrae los sulfatos de la solución del suelo y también los que se encuentran en forma adsorbida en la fase sólida. Sin embargo, el método no permite estimar el S orgánico fácilmente mineralizable, al cual también se le ha atribuido importancia para recomendaciones de manejo de S en pasturas (Edmeades *et al.*, 1994).

EVALUACIÓN DE PRODUCCIÓN DE FORRAJE

La producción de forraje fue evaluada con corte a una altura de 5 cm aproximadamen-

te, en un área de muestreo de 3 m². Para ello se emplearon máquinas cortadoras provistas con canasto colector, registrando en el campo el peso verde de forraje cortado. De las parcelas de los tratamientos N° 2, 3, 4, 10, 11 y 12 se conservaron muestras de forraje verde para determinar el contenido de materia seca (105°C, 24-48 horas). Previo al corte se realizó una estimación visual de la composición botánica en cada parcela, distinguiendo dos fracciones: la especie sembrada (trébol blanco o lotus) y otras especies (malezas). Luego del corte de evaluación, todas las parcelas fueron cortadas a la misma altura, retirándose todo el forraje cortado fuera del experimento. Como criterio general, el corte de evaluación se realizó cuando el forraje alcanzó una altura de 10-15 cm ó 15-20 cm, de trébol blanco y lotus respectivamente. De esta manera, se realizaron de 3 a 6 cortes por año en la mayoría de los experimentos, una vez implantada la pastura.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se emplearon distintos análisis estadísticos según los distintos objetivos del trabajo y por ello se explicarán con detalle en cada capítulo.

BIBLIOGRAFÍA

- AYALA, W.; BERMÚDEZ, R.** 2008. Fertilización fosfatada sobre mejoramientos de campo con lotus cv. El Rincón y lotus cv. Maku en suelos superficiales. En: Bermúdez, R.; Ayala, W. (eds.). Seminario de actualización técnica: fertilización fosfatada de pasturas en la región este, INIA Treinta y Tres. Montevideo: INIA. p. 51-61. (Serie Técnica; 172)
- BARBAZÁN, M.; FERRANDO, M.; ZAMALVIDE, J.** 2007. Estado nutricional de *Lotus corniculatus* L. en Uruguay. Agrociencia, 11(1): 22-34.
- BERMÚDEZ, R.; CARÁMBULA, M.; AYALA, W.** 2000. Estudio comparativo de diferentes fuentes y dosis de fósforo sobre el comportamiento productivo de un mejoramiento extensivo con trébol blanco y lotus. En: Jornada anual de producción animal: resultados experimentales. Unidad Experimental Palo a Pique, INIA Treinta y Tres. Montevideo: INIA. p. 17-24. (Serie Actividades de Difusión; 225)
- BOLAN, N.S.; WHITE, R.E.; HEDLEY, M.J.** 1990. A review of the use of phosphate rocks as fertilizers for direct application in Australia and New Zealand. Australian Journal of Experimental Agriculture, 30(2): p. 297-313
- BORDOLI, J.M.** 2003. El fósforo en la agricultura uruguaya: pasturas y trigo. En: SIMPOSIO (2003, Rosario, Argentina). El fósforo en la agricultura argentina. Buenos Aires: INPOFOS Cono Sur. p. 33-38.
- BORDOLI, J.M.** 2007. Fertilización de pasturas de leguminosas y mezclas de gramíneas y leguminosas. Manejo de la fertilidad en sistemas extensivos (Cultivos y Pasturas). Unidad de Educación Permanente y Postgrado. Montevideo: Facultad de Agronomía. p. 71-79.
- BOUYOUCOS, G.J.** 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. Agronomy Journal, 54:464-465.
- BRAY, R.H.; KURTZ, L.T.** 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. Soil Science, 59(1): 39-45.
- CANTARELLA, H.; PROCHNOW, L.I.** 2001. Determinação de sulfato em solos. En: Raij, B. van; Andrade, J.C.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A. (Eds.). Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas. p. 225-230.
- CASTRO, J.L.; ZAMUZ, E.M. DE; OUDRI, N.** 1981. Guía para fertilización de pasturas. En: Fertilización de pasturas, INIA La Estanzuela. Montevideo: CIAAB. p. 1-15. (Miscelánea; 37).
- EDMEADES, D.C.; SINCLAIR, A.G.; WATKINSON, S.H.; LEDGARD, S.F.; GHANI, A.; THORROLD, B.S.; BOSWELL, C.C.; BRAITHWAITE, A.C.; BROWN, M.W.** 1994. Some recent developments in sulphur research in New Zealand agriculture. Sulphur in Agriculture, 18:3-8.
- INIA.** 2010. Reunión técnica: fertilización en pasturas. Durazno: INIA. 69 p. (Serie Actividades de Difusión; 631)
- JONES, M.B.** 1986. Sulfur availability indexes. En: Tabatabai, M.A. (ed.). Sulfur in Agriculture. Madison: American Society of Agronomy. v. 27, p. 549-566.
- KHASAWNEH, F.E.; DOLL, E. C.** 1978. The use of phosphate rock for direct application to soils. Advances in Agronomy, 30: 159-206.
- KRUSELL, L.; KRAUSE, K.; OTT, T.; DESBROSSES, G.; KRAMER, U.; SATO, S.; NAKAMURA, Y.; TABATA, S.; JAMES, E.K.; NIELS, S.; STOUGAARD, J.; KAWAGUCHI, M.; MIYAMOTO, A.; SUGANUMA, N.; UD-VARDI, M.K.,** 2005. The sulfate transporter SST1 is crucial for symbiotic nitrogen fixation in *Lotus japonicus* root nodules. Plant Cell, 17(5): 1625-1636.

MALLARINO, A.P.; CASANOVA, O. 1984. Fertilización fosfatada de leguminosas forrajeras en suelos de texturas medias y finas. *Revista de la Asociación de Ingenieros Agrónomos del Uruguay*, 2: 196-203.

MILLOT, J.C.; RISSO, D.; METHOL, R. 1987. Relevamiento de pasturas naturales y mejoramientos extensivos en áreas ganaderas del Uruguay: Informe técnico para la Comisión Honoraria del Plan Agropecuario. Montevideo: MGAP. 199 p.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA – DIRECCION DE SUELOS Y FERTILIZANTES. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay a escala 1/1000.000 y clasificación de suelos del Uruguay. Montevideo, Uruguay. Tomo 3. 452 p.

MORÓN, A. 1982. I. Fuentes de fósforo para pasturas. En: Fuentes de fósforo para pasturas. Estanzuela, Colonia: CIAAB. p.1-24 (Miscelánea; 42)

MORÓN, A. 1984. Revisión crítica de la guía de fertilización de pasturas. *Revista de la Asociación de Ingenieros Agrónomos del Uruguay*, 2: 181-195.

MORÓN, A. 1996a. Azufre: consideraciones sobre su situación en Uruguay. En: Morón, A.; Martino, D.; Sawchik, J. (Eds), Manejo y fertilidad de suelos, INIA La Estanzuela. Montevideo: INIA. p. 73-79. (Serie Técnica; 76).

MORÓN, A. 1996b. El fósforo en los sistemas productivos: dinámica y disponibilidad en el suelo (I). En: Morón, A.; Martino, D.; Sawchik, J. (eds.), Manejo y fertilidad de suelos, INIA La Estanzuela. Montevideo: INIA. p. 37-44. (Serie Técnica; 76)

MORÓN, A. 2007. Avances hacia a una nueva guía de fertilización de pasturas. SEMINARIO INTERNACIONAL DE NUTRICIÓN VEGETAL (Paysandú, Uruguay, 2007). Criterios para la Fertilización de cultivos y pasturas. Paysandú: UDELAR. EEMAC, Facultad de Agronomía.

MORÓN, A. 2008. Relevamiento del estado nutricional y la fertilidad del suelo en cultivos de trébol blanco en la zona Este de Uruguay. En: Bermúdez, R.; Ayala, W. (eds.). Seminario de actualización técnica: fertilización fosfatada de pasturas en la región este, INIA Treinta y Tres. Montevideo: INIA. p. 17-29. (Serie Técnica; 172)

MURPHY, J.; RILEY, J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27: 31-36.

PALERMO, M.A.; PÉREZ, M.; SERVETTO, M.A. 1985. Índices de disponibilidad de nitrógeno y fósforo en suelos arroceros. Tesis Ing. Agr., Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. 98 p.

RAJAN, S.S.S.; WATKINSON, J.H.; SINCLAIR, A.G. 1996. Phosphate rocks for direct application to soils. *Advances in Agronomy*, 57: 77-159.

RISSO, D.F.; MORÓN, A.; ZARZA, A. 2002. Fuentes y niveles de fósforo para mejoramientos de campos en suelos de la región de cristalino. En: RISSO, D.F.; Montossi, F. (eds.). Mejoramientos de campo en la Región de Cristalino: Fertilización, producción de carne de calidad y persistencia productiva, INIA Tacuarembó. Montevideo: INIA. p. 115-151. (Serie Técnica; 129)

SCHERER, H.; LANGE, A. 1996. N₂ fixation and growth of legumes as affected by sulphur fertilization. *Biology and Fertility of Soils*, 23: 449-453.

SINCLAIR, A.; MORRISON, J.; SMITH, L.; DODDS, K. 1996. Effects and interactions of phosphorus and sulphur on a mown white clover/ryegrass sward. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 39: 435-445.

TINSLEY, J. 1967. Soil Science. Manual of Experiments. Aberdeen: University of Aberdeen. Department of Soil Science. 124 p.

URUGUAY. MGAP. 1979. Grupos de suelos. Índices de productividad. Montevideo: Ministerio de Agricultura y Pesca. Comisión de Estudio Agroeconómico de la Tierra. 167 p.

ZAMALVIDE, J. 1995. Deficiencias de azufre en suelos del Uruguay. Revista Plan Agropecuario, 67: .31-35.

ZAMALVIDE, J. 1998. Fertilización de pasturas. En: Berretta, E.J. XIV Reunión del Grupo técnico regional del Cono Sur en mejoramiento y utilización de recursos forrajeros del área tropical y subtropical: Grupo Campos, 14., INIA Tacuarembó. Montevideo: INIA. p. 97-107. (Serie Técnica; 94)

ZAMALVIDE, J.P.; MALLARINO, A.P.; CASANOVA, O.N.; GENTA, H. 1978. Evaluación del comportamiento de cinco métodos para estimar fósforo disponible en suelos del Uruguay. En: REUNIÓN. 1era Reunión Técnica Facultad de Agronomía, Montevideo.

ZAMUZ, E.M. DE; CASTRO, J.L. 1974. Evaluación de métodos de análisis de suelos para determinar fósforo asimilable. Montevideo: CIAAB. 15 p. (Boletín Técnico; 15)

ZAPATA, E.; ROY, R.N., 2007. Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible. Roma: FAO. 155 p. (Boletín FAO Fertilizantes y Nutrición vegetal; 13)