

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

HISTORIA DE LA INVESTIGACIÓN SOBRE RESPUESTA AL FÓSFORO EN
URUGUAY. CONSTRUCCIÓN DE NIVELES CRÍTICOS GENERALES Y UNA
PROPUESTA DE EQUIVALENTE FERTILIZANTE

por

María Belén VEGA CONDE

TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo.

MONTEVIDEO
URUGUAY
2022

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. Esteban Hoffman

Ing. Agr. MSc. Nicolás Fassana

Ing. Agr. PhD. Guillermo Siri-Prieto

Fecha: 20 de mayo de 2022

Autora:

María Belén Vega Conde

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, amigas y pareja por el acompañamiento y motivación brindada a lo largo de toda la carrera.

Al Ing. Agr. Esteban Hoffman, director de la presente tesis por su invaluable dedicación, disposición a enseñar y ocupación constante.

Al Ing. Agr. Nicolás Fassana, cotutor de la tesis, por sus importantes aportes en el procesamiento de datos y análisis de la información.

Al personal de la biblioteca, por su gran ayuda en el acceso a la información.

Al Ing. Agr. Guillermo Siri, por formar parte del tribunal de defensa.

A la Lic. Sully Toledo, por sus aportes en la corrección de los aspectos formales del trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1 GENERALIDADES DEL FÓSFORO.....	2
2.1.1 <u>Dinámica del fósforo en el suelo</u>	2
2.1.2 <u>Dinámica del fósforo en la planta</u>	3
2.1.3 <u>Dinámica del fósforo en la planta</u>	3
2.2 RESPUESTA VEGETAL A LA FERTILIZACIÓN FOSFORADA.....	4
2.3 EL FÓSFORO AGREGADO Y EL CAMBIO EN EL FÓSFORO DISPONIBLE.....	6
2.4 LA NECESIDAD DE ESTIMAR LA DOSIS ÓPTIMA DE P NECESARIA EN FUNCIÓN DEL NIVEL INICIAL DE FÓSFORO EN SUELO.....	9
2.5 HIPÓTESIS DEL TRABAJO.....	10
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	11
3.1 REVISIÓN DE ENSAYOS DE FERTILIZACIÓN FOSFORADA EN URUGUAY.....	11
3.1.1 <u>Procedimientos de búsqueda y recopilación de datos</u>	11
3.1.1.1 Fuentes de información.....	11
3.1.1.2 Estructura de la base de datos.....	11
3.1.1.3 Criterios de selección de ensayos.....	12

3.2	ESQUEMA DE PROCESOS Y RESULTADOS	13
4.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	15
4.1	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN NACIONAL	15
4.1.1	<u>Distribución geográfica de los experimentos</u>	16
4.1.2	<u>Ubicación temporal</u>	17
4.1.3	<u>Descripción de las principales características del suelo</u>	19
4.1.4	<u>Caracterización de los niveles de fósforo en suelo</u>	20
4.1.5	<u>Descripción del manejo del cultivo</u>	21
4.1.6	<u>Descripción del manejo de la fertilización fosforada</u>	22
4.1.7	<u>Respuesta vegetal al agregado de fósforo</u>	22
4.2	RELACIÓN ENTRE EL RENDIMIENTO RELATIVO Y EL P IIICAL EN SUELO TODOS LOS SITIOS EXPERIMENTALES	26
4.3	DETERMINACIÓN DE LA DEFICIENCIA FOSFORADA A TRAVÉS DE LA EVOLUCIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA EN FUNCIÓN DEL FÓSFORO DISPONIBLE EN SUELO	30
4.3.1	<u>Caracterización temporal de la evolución de dosis óptima</u>	30
4.3.2	<u>Relación entre la dosis óptima y la concentración de fósforo disponible en el suelo</u>	31
5.	<u>CONCLUSIONES</u>	36
6.	<u>RESUMEN</u>	38
7.	<u>SUMMARY</u>	39
8.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	40

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Número y proporción de los experimentos de la base de datos, que incluye información clasificada según características del suelo y manejo de la fertilización ..	15
2. Publicaciones revisadas y ensayos instalados en Uruguay por período, según cultivo, desde 1969 hasta 2014	18
3. Distribución de los niveles de P Bray-1, según las clases texturales de suelo, para los ensayos de fertilización fosforada en Uruguay relevados	21
4. Coeficientes del modelo lineal plateau para la relación entre el rendimiento relativo y el fósforo en el suelo según clase textural.....	29
5. Valor promedio del fósforo disponible inicial en el suelo, agrupado en tres períodos de tiempo y su relación con las dosis óptimas	31
6. Valores de a y b de la ecuación $a + bx$ utilizada para isolíneas empíricas y RMSE para cada una de las isolíneas.....	33
Figura No.	
1. Modelo simplificado de etapas y procesos de la investigación.....	13
2. Proporción de sitios por departamento con relación a todos los experimentos que componen la base de datos sobre fertilización fosforada en Uruguay (a) y la proporción de cada categoría de experimentos con relación al total de cada departamento (b)	16
3. Evolución del número acumulado de publicaciones sobre respuesta al agregado de fósforo en Uruguay, para cultivos extensivos	18
4. Número de ensayos por año y acumulado (a), y frecuencia acumulada en % (b) de todos los experimentos que componen la base de datos, desde 1962 hasta 2011	19
5. Proporción de sitios experimentales para cada clase textural	20
6. Árbol de clasificación y regresión-CART (Classification and Regression Tree), que describe la relación entre el rendimiento relativo expresado en función del rendimiento máximo y las principales variables asociadas a la respuesta vegetal al agregado de fósforo	23
7. Relación entre el rendimiento relativo expresado en función del rendimiento máximo, y los grupos de fósforo disponible en el suelo de las cuatro bases que generó el árbol de clasificación y regresión	25
8. Relación entre rendimiento relativo (RR) y P - Bray I del suelo (ppm) de todos los sitios experimentales, para los máximos niveles de respuesta, independiente del	

tipo de cultivo.....	26
9. Relación entre rendimiento relativo (RR) y P-Bray I del suelo (ppm) en cultivos de invierno (a) y verano (b) para los niveles máximos de respuesta	27
10. Relación entre rendimiento relativo (RR) y P - Bray I del suelo (ppm) en cultivos de verano para textura media gruesa (a) y fina (b) en función de los niveles máximos de respuesta	28
11. Rendimiento relativo en función del nivel de P en suelo, de todos los cultivos para las clases texturales principales.....	29
12. Evolución temporal de las dosis óptimas utilizadas para tres períodos de tiempo: hasta 1975, 1975-1990 y 1990-2010.....	30
13. Relación entre el valor de dosis óptima y el nivel de fósforo disponible en el suelo para sitios de textura media-fina (a) y el RMSE de cada isolínea (b)	32
14. Relación entre el valor de la dosis óptima y el nivel de fósforo disponible en el suelo, para los sitios dentro de la función frontera hasta el nivel crítico (a) y considerando todos los valores por encima del nivel crítico como parte del grupo que representa la dosis máxima (b).....	34

1. INTRODUCCIÓN

Es un hecho conocido e investigado en profundidad en Uruguay, que por el bajo nivel de fósforo (P) que presentan los suelos del territorio uruguayo en su estado natural, desde hace más de 50 años la fertilización fosforada a cultivos y pasturas es una práctica inevitable.

Aunque la historia de fertilización ha incrementado los valores de P en suelo, la disponibilidad de este nutriente sigue siendo limitante. Por lo tanto, sin la fertilización se estaría sometiendo a los cultivos a convivir en un ambiente pobre durante su crecimiento y desarrollo.

Una porción importante de los costos de producción de los cultivos extensivos para grano en la actualidad está ocupada por el gasto en fertilizantes, entre los cuales el fosforado es casi un componente fijo. Es por ello, que las cantidades óptimas reales a utilizar, las que primero permitan cubrir las necesidades de P de los cultivos, son la base del manejo eficiente de este nutriente, tanto desde el punto de vista biológico como económico. Además, una dosificación correcta contribuirá a disminuir el impacto ambiental de esta práctica de manejo.

La dosificación correcta debería definirse en función del nivel de P en suelo, del/los niveles críticos y de equivalentes fertilizantes (EF) ajustados.

Este trabajo en el cual se revisará la historia de la investigación nacional sobre la fertilización fosforada en cultivos anuales para grano tiene como grandes objetivos poder aproximarse a niveles críticos fósforo en suelo para los cultivos anuales para grano y establecer una relación entre la dosis óptima con el nivel de P disponible en el suelo.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 GENERALIDADES DEL FÓSFORO

2.1.1 Dinámica del fósforo en el suelo

En general, el contenido total de P presente en los suelos de Uruguay es bajo. Oscila entre 0.013 a 0.089%, con un promedio de 0.032%, variando según el material de origen y el grado de meteorización del suelo. Se destacan altos contenidos de P en suelo para aquellos derivados de Basalto, donde la alteración de la roca dio origen a texturas finas y gran proporción de materia orgánica. Niveles de P medios a altos están asociados a suelos de sedimentos limo arcillosos como es el caso de las Formaciones Libertad, Fray Bentos y Yaguarí. Los niveles más bajos se encuentran en suelos derivados de Basamento Cristalino, con textura gruesa y bajo contenido de materia orgánica. Ejemplos típicos de este caso son suelos arenosos, planosles y solods del Este (Hernández et al., 1995).

En la fase sólida del suelo, el P se encuentra bajo diversas formas, tanto inorgánicas como orgánicas. La primera forma se encuentra generalmente combinado con hierro, aluminio, calcio y materiales arcillosos de distintos tipos, variando su proporción relativa según el pH, la cantidad y el tipo de minerales existentes en la fracción arcilla (Morón, 1992). Es posible clasificarlo en P inorgánico lábil haciendo referencia a aquel que está en equilibrio con la solución del suelo y fácilmente disponible para ser absorbido por las plantas, y P inorgánico fijado para aquellas formas de casi nula solubilidad o reactividad (Zamalvide, 1996). Esta última oscila entre un 15 a un 80% del P total, dependiendo de la naturaleza del suelo y su composición.

La segunda, forma parte de la materia orgánica del suelo y tiende a seguir el mismo proceso de acumulación o pérdida. Además, disminuye en profundidad junto con el carbono orgánico (Stevenson y Mole, 1986). En Uruguay esta fracción representa en promedio el 50% del P total (Zamalvide, 1992).

Por otro lado, el suelo presenta una fase en solución que está en constante equilibrio con la fase sólida ya que es de donde los cultivos y pasturas obtienen principalmente el ion ortofosfato (HPO_4^{-2} o $\text{H}_2\text{PO}_4^{-}$), disponible para ser absorbido por las raíces y posteriormente utilizado. Este equilibrio químico se mantiene dado que el P adsorbido en la fase sólida es liberado a la solución una vez que las raíces absorben el P ya existente (Zamalvide, 1992). La cantidad de P presente en solución del suelo sería de 25 g P ha^{-1} si se considera una hectárea a 20 cm de profundidad, con un 25% del volumen ocupado por agua y para una concentración de 0.05 $\mu\text{g P ml}^{-1}$ en la solución del suelo (Hernández, 1999). La absorción de P por cultivos y/o pasturas en un ciclo de crecimiento absorbe varias veces esa cantidad. Por tanto, debe existir una constante reposición desde la fase sólida para suplir las necesidades de las plantas (Morón, 1996).

2.1.2 Dinámica del fósforo en la planta

Las cantidades de P absorbido por las plantas en determinada unidad de tiempo, es función de dos grandes factores. En primer lugar, por el volumen radicular o más exactamente la cantidad de superficie de contacto raíz-suelo y en segundo lugar por la concentración de P en la solución del suelo en los puntos de contacto con la raíz, durante el proceso de equilibrio entre lo que la raíz retira y el suelo repone (Zamalvide, 1992).

Una vez absorbido el P, puede almacenarse en las raíces hasta ser requerido o puede transportarse inmediatamente hacia partes superiores. Por medio de diversas reacciones químicas, es incorporado a compuestos orgánicos como ácidos nucleicos (ADN y ARN), fosfoproteínas, fosfolípidos, enzimas y compuestos fosfatados ricos en energía como la adenosina trifosfato. Es fundamental en la transferencia de energía y en la formación de estructuras químicas encargadas de desencadenar múltiples reacciones y procesos esenciales para la planta. En el proceso de fotosíntesis, el ATP captura la energía solar, quedando compuestos inmediatamente disponibles para otras reacciones, además de formar azúcares que se usan como bloques para construir otras células estructurales y compuestos para almacenamiento. El P también juega un papel importante en la conformación de genes y cromosomas encargados de transferir el código genético a las próximas generaciones (crecimiento y reproducción de la planta). Por el mismo motivo, es necesario para el desarrollo de nuevas células. Gran cantidad de P se acumula en las semillas y en el fruto por lo que un mal suplemento de P puede reducir el tamaño, número y viabilidad de estas.

Debido a que las plantas pueden absorber mayores cantidades de nutrientes que las presentes en la solución del suelo, estos son acumulados. El movimiento de estos nutrientes dentro de la planta es a través de las membranas de las células, proceso que requiere de energía para contrarrestar las fuerzas de osmosis. La energía necesaria para este proceso proviene del ATP y otros compuestos fosfatados (Armstrong, 1999).

Debido a que el P es un elemento muy móvil dentro de la planta, es fácilmente movilizado, cuando ocurren deficiencias de este nutriente, el mismo se transloca desde las hojas viejas hacia las hojas en crecimiento, ya que son de prioridad. Por lo tanto, los síntomas de carencia se presentan en las hojas viejas, generalmente traducidos en un amarillamiento, con tonos antocianicos en algunas especies como maíz (Morón, 1995).

2.1.3 Dinámica del fósforo en la planta

Según Larsen, citado por Morón (1992), se entiende por lábil o disponible, aquella fracción del P inorgánico presente en fase sólida capaz de reponer el P en la solución del suelo a medida que disminuye su valor de equilibrio. La absorción por parte de raíces de las plantas en crecimiento disminuye constantemente la concentración de P respecto al valor de equilibrio. Por su parte, Zamalvide (1992) estudió que esta fracción es acrecentada transitoriamente por los productos de reacción del suelo con los

fertilizantes y que sin duda mantener un nivel adecuado de P "lábil" es el factor principal para un buen suministro de P a las plantas. Este suministro es generalmente evaluado a través del análisis de suelo de P "asimilable" que da un número que aspira a estar correlacionado con el valor del P "lábil".

En términos generales, las diferentes metodologías de análisis del P presente en la fracción lábil, se basan por una parte en la utilización de extractantes químicos que solubilizan o forman complejos con los cationes que retienen al P, tal es el caso del método Bray 1, utilizado mayormente en Uruguay. Otros métodos utilizados en distintos países son Olsen, Mehlich 1 y Mehlich 3. Por otra parte, la utilización de resinas de intercambio aniónico/catiónico, capaces de retener aniones como el fosfato y/o cationes que retienen al P como hierro, aluminio y calcio. Este último es el caso del método de resinas catiónicas que al extraer cantidades de P más elevadas que los métodos químicos, se interpreta que realizan una mejor estimación de la cantidad de P presente en la fracción lábil, siendo particularmente útil para aquellos casos donde los demás métodos no reflejan adecuadamente la disponibilidad de P o no extraen cantidades significativas que si se evidencian a través del crecimiento vegetal. Dichos casos corresponden a: suelos altamente fijadores, suelos desarrollados sobre materiales de basalto, suelos fuertemente ácidos o suelos con altas concentraciones de calcio (CaCO_3). También en situaciones donde hubo grandes aplicaciones de apatitas u otros fertilizantes fosfatados insolubles, donde el método Bray 1 no evalúa adecuadamente la disponibilidad de P (Hernández, 1999).

Ciampitti (2009), señala que los principales factores que afectan la disponibilidad de P para los cultivos, así como la respuesta a la fertilización fosfatada, están relacionados con factores del suelo (ya sean físicos como textura, aireación, compactación, temperatura, humedad; químicos como mineralogía, pH, materia orgánica, capacidad de adsorción e interacción con otros nutrientes; a factores biológicos en el suelo como residuos, raíces, bacterias, micorrizas) y a los asociados a la planta (en cuanto al desarrollo y distribución de raíces, especie, híbrido o variedad, y nivel de rendimiento).

2.2 RESPUESTA VEGETAL A LA FERTILIZACIÓN FOSFORADA

Realizar el diagnóstico de fertilidad fosforada en base al análisis de suelo en la capa superficial, que determina el nivel de P extractable por los cultivos, implica interpretar el resultado y definir la probabilidad de respuesta al agregado de este nutriente. Dodd y Mallarino (2005), propusieron que la relación existente entre el rendimiento relativo (RR%) y el nivel de P en el suelo (P Bray-1 o Melich-3, ppm), establece probabilidades de respuesta y beneficio económico para distintos rangos de P disponible en suelo. Cuando los niveles de P son muy bajos o bajos, la probabilidad de respuesta es alta y a partir de ahí disminuye hacia los niveles óptimos. En contraste, ante niveles altos o muy altos de P, la probabilidad es baja a casi nula, respectivamente.

Según la información nacional, se estima que los niveles críticos, por encima de los cuales es poco probable la existencia de respuesta vegetal a la fertilización fosforada, es variables entre cultivos para grano. En maíz y sorgo este valor se sitúa en el rango de 14-16 ppm (P Bray-1), mientras que en soja es inferior y oscila en torno a 12 ppm (Quincke et al., 2008). En cereales de invierno, trigo y cebada, el nivel crítico (Bray-1 a 15 cm de profundidad) según Capurro et al. (1982), Hernández (1999), se ubicaría entre 12 y 13 ppm.

Más recientemente Bordoli et al. (2001), realizaron 21 experimentos de fertilización fosfatada en trigo bajo siembra directa durante 1997, 1998 y 1999, en suelos de texturas medias y media- pesadas. A pesar de que el coeficiente de determinación fue bajo, estimaron un nivel crítico general de 13 ppm de P en el suelo. Estos resultados difieren de los encontrados por otros autores (Gutiérrez et al., 2010) quienes luego de 9 años de experimentación en una red de nutrición en Argentina, mencionan niveles críticos cercanos a 18,5 ppm.

Luego de catorce años de experimentación, Sucunza et al. (2018), establecieron niveles críticos de 14, 13 y 19 ppm para soja, maíz y trigo, respectivamente en la Región Pampeana Argentina.

En diversas regiones de Argentina se han llevado a cabo estudios sobre una amplia gama de suelos y años, para el cultivo de soja, para el cual se reporta respuesta al agregado de P entre niveles de 8,5 a 13 ppm (Melgar et al. 1995, Barbagelata et al. 2002, Ferrari et al. 2005).

Para maíz, según el trabajo de Gutiérrez et al. (2010) el nivel crítico determinado por Cate y Nelson (1995), se ubicó entre 11 y 13 ppm. Por su parte Mallarino y Blackmer (1992) en Estados Unidos, utilizando el mismo método determinaron un nivel crítico de 13 ppm.

Además de la gran variación mencionada entre cultivos, Cubilla (2005) en Paraguay, estudió el impacto sobre el nivel crítico de trigo, maíz y soja cultivados en siembra directa, para dos rangos de arcilla: 210-400 y 410-600 g kg⁻¹. Para los suelos de 210 a 400 g kg⁻¹, el valor crítico, fue de 15 ppm, mientras que los de 410 a 600 g kg⁻¹, el valor descendió a 12 ppm de P, determinado por el método Mehlich 1 y a una profundidad de 0-10 cm. Por otro lado, Schlindwein (2003) en Brasil, encontró tenores críticos de P mayores que los anteriores, estimando en 30, 21 y 12 ppm, respectivamente, para las clases texturales de arcilla de 110-400, 410-550 y >550 g kg⁻¹, determinados por el mismo método anterior, profundidad y sistema de siembra.

En cuanto a la respuesta vegetal, Guillamón (1984), obtuvo respuesta al P en trigo y sorgo en dos localidades diferentes de Uruguay correspondientes a dos sitios, con bajo nivel inicial de P. Las dosis utilizadas variaron de 10 a 80 kg de P₂O₅ ha⁻¹, encontrándose respuesta cuando el agregado de P se situó entre 20 a 80 kg de P₂O₅ ha⁻¹.

Labella y Améndola (1977), encontraron diferencias significativas en rendimiento en grano para maíz, sorgo y soja agregando entre 60 y 180 kg de P_2O_5 ha⁻¹, bajo praderas arenosas y negras, analizando cuatro fuentes distintas. Todos los experimentos respondieron de manera más eficiente al superfosfato simple granulado.

Chebataroff et al. (1985), reportan importante respuesta a la aplicación de P en soja, para tres y cuatro sitios de las Unidades de Suelo Alférez y Vergara respectivamente, en el Este del país en campos nuevos o rastrojo. En aquellos sitios con un nivel inicial de P de 5 a 7 ppm Bray-1, las respuestas fueron mayores, no encontrándose respuesta significativa cuando el nivel inicial fue de 13 ppm.

Bordoli et al. (2001), en 21 experimentos de fertilización fosfatada de trigo en siembra directa durante los años 1997, 1998 y 1999, seleccionaron sitios con una amplia gama de disponibilidad de P. Los sitios se ubicaron sobre suelos de texturas medias y medias-pesadas. Cuando la respuesta fue significativa, siempre se relacionó al bajo contenido inicial de P disponible. En 1997 los rendimientos fueron inferiores, en algunos sitios debido a un enmalezamiento con avena y en 1999 debido a una helada tardía. En este trabajo se evaluaron dos formas de aplicación (al voleo e incorporado sobre la superficie), no encontrándose diferencias significativas de la localización en ningún sitio.

Por su parte Morón (2003), evaluó la respuesta del cultivo de soja en ocho sitios con contenido de P variable, para los cuales la respuesta fue significativa cuando el nivel inicial de P fue inferior a 13 ppm según Bray 1.

Boxler et al. (2006) en el Sur de Argentina, encontraron respuesta al P en trigo y soja debido a efectos residuales de fertilización acumulada. Los incrementos de rendimiento engrano, en promedio fueron de 854 y 201 kg ha⁻¹ para 25 sitios, en cuatro zafra distintas. Cuando los niveles de P disponible en suelo fueron iguales a 13 ppm, se lograba alcanzar el 90% del rendimiento máximo.

En síntesis, una deficiencia de P puede provocar caídas en el rendimiento cuya magnitud estará determinada por las características del ambiente productivo. Además, esta magnitud se reduce cuando los cultivos alcanzan un valor crítico de P en suelo, por encima del cual no se espera respuestas al agregado de P. Este valor varía en función de la textura del suelo donde a mayor contenido de arcilla, desciende el nivel crítico en primer lugar, y del cultivo según algunos autores, siendo los niveles inferiores para soja y maíz.

2.3 EL FÓSFORO AGREGADO Y EL CAMBIO EN EL FÓSFORO DISPONIBLE

Existen trabajos que muestran una relación lineal entre P agregado y la evolución del P disponible. Ello permitiría calcular la cantidad de P a agregar para pasar de un nivel dado al nivel que se desee obtener, para un suelo dado. Esto es considerado por muchos un equivalente fertilizante y expresa la cantidad de unidades de P que es necesario agregar para elevar el P disponible en una parte por millón (1 ppm P) a una cierta profundidad. Este valor varía para diferentes suelos, dependiendo de su textura, pH, potencial de retención de P, entre otros.

Algunos trabajos en este sentido muestran que, para suelos pesados, de pH en general mayor a 5,7, oscila entre 10 a 12 según se aplique superfosfato o fosforitas, respectivamente. En suelos de textura media y pH entre 5,5 a 6, varía de 5 para superfosfato a 7 para fosforitas. En suelos de textura liviana y pH menor a 5,6, oscila entre 7 y 9, siguiendo el mismo criterio según la fuente aplicada (Castro et al., 1981). Baethgen y Pérez (1981), en un ensayo instalado sobre la Unidad de Kiyú también establecieron una relación lineal entre el P agregado inicialmente y el cambio en el P disponible en el suelo. Sin embargo, reportaron valores de 16,6 y 20,2 kg de P_2O_5 ha⁻¹, para incrementar en 1 ppm el P disponible en suelo. Los mismos autores remarcaron estos valores como apreciablemente superiores a los indicados por Castro et al. (1981) para el mismo tipo de suelo e igual profundidad de la muestra analizada.

Hernández et al. (1995), en Uruguay muestran una relación exponencial, en vez de lineal, entre el P agregado y el incremento de P asimilable por análisis de suelo bajo pasturas. En este modelo se asume que para elevar inicialmente el P asimilable se consume menos fertilizante que para lograr el mismo incremento en valores más alto de P. A modo de ejemplo, es necesario agregar más fertilizante para subir el valor de análisis de 2 a 4 ppm que de 10 a 12 ppm.

Rubio et al. (2007), analizaron 71 suelos (orden Molisoles) y obtuvieron un coeficiente b definido como el incremento en el P extractable ante la adición de un mg P kg⁻¹ en el suelo a los 45 días post aplicación, para la región Norte y Sur de Argentina. Los suelos de la región Norte, con menor contenido de arcilla, carbono total y nivel inicial de P en suelo, presentaron un coeficiente b mayor que los suelos de la región Sur (0,58 en comparación a 0,41, respectivamente). Esta diferencia fue significativa al 1%. Para calcular la dosis recomendada en kg P ha⁻¹ se utiliza el coeficiente en dicha ecuación: kg P ha⁻¹ = 0,1 (densidad aparente (ton m⁻³) * profundidad (cm)) / coeficiente b. Los modelos desarrollados pueden ser usados para decidir la cantidad a agregar de P, para elevar el contenido de P extractable del suelo a un determinado valor objetivo. Este trabajo se realizó en contenedores plásticos dispuestos al aire libre protegidos del sol, sometidos a las variaciones naturales de temperatura en las que crecería el cultivo, mantenidos entre el 50 y el 90% de capacidad de campo.

Sin embargo, diversos estudios comprueban la complejidad en la dinámica del P en el suelo, cuestionan el aumento en el nivel de este nutriente luego de la aplicación de P, o su descenso inmediato al finalizar el ciclo del cultivo sembrado.

Hoffman (2013), en su estudio sobre la fertilización fosforada y la residualidad del P para un cultivo de soja de segunda, encontró que aún ante agregados de P por encima de las necesidades del cultivo, no hay garantías de que el nivel en el suelo se incremente, incluso puede disminuir. La variable asociada con el decremento del P en suelo fue la condición de déficit hídrico severo 30 días previos al muestreo de suelo. Esto coincide con lo estudiado por Ferrando et al. (2002), quienes demuestran que la ocurrencia de períodos cortos y frecuentes de anaerobiosis en los suelos conduce a variaciones en la disponibilidad de P. Ante períodos de exceso de agua en los suelos se establecen

condiciones reductoras, las cuales determinan un aumento en los contenidos y proporciones de óxidos de Fe de baja cristalinidad. En esta etapa de reducción del suelo, se produce un aumento en los niveles de P asimilable asociado al aumento en la solubilidad de los compuestos con Fe (por su reducción a Fe^{+2}) y la liberación de fosfatos a la solución. El retorno a condiciones de oxidación determinó una disminución del P, a valores aún por debajo de los iniciales antes de inundar. Esto surge debido a la re-adsorción del P en superficies de óxidos de Fe recientemente precipitados a compuestos altamente insolubles. La menor disponibilidad de P fue también evidenciada en menores contenidos de P en planta, respecto a las situaciones donde no hubo exceso de agua previo.

Erro et al. (2012) en Uruguay, estudiaron la respuesta a la fertilización en soja de segunda y analizaron el comportamiento del P en catorce sitios para un período de 90 días posteriores a la siembra, en función de la dosis agregada (0, 30 y 60 $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) y las precipitaciones acumuladas (mm). Excepto en dos sitios, no se observó diferencias significativas en el nivel de P del suelo, entre tratamientos para un mismo día luego de la fertilización. A su vez, tomando como referencia un equivalente fertilizante promedio de 10 $\text{kg P}_2\text{O}_5$ para elevar 1 ppm en suelo, graficaron la relación entre el valor estimado de P-Bray I en suelo a 90 días en base al valor original a siembra y el incremento teórico por agregado de 30 y 60 unidades de P_2O_5 y valor real de P-Bray I en suelo a 90 días. Se observó un coeficiente de correlación bajo ($R=35\%$) y no significativo, ya que en la mayoría de los casos el P disminuyó o se mantuvo igual, sin incrementar de forma proporcional a lo esperado. Por lo tanto, concluyeron que un equivalente fertilizante en término de cuanto P hay que agregar para elevar el P disponible en suelo en el corto plazo, no es un parámetro fijo, que depende de las características fisicoquímicas del sitio y de la demanda del cultivo en crecimiento. Sin considerar el tiempo entre los cambios de P en suelo y el agregado, una variable que no ha sido especialmente atendido por la mayoría de los trabajos que intentan calcular un coeficiente entre agregado y cambio de P en suelo.

En este sentido Esilaba et al. (1992), trabajaron sobre la evolución en el contenido de este nutriente para un período de 0 a 20 meses luego de la aplicación de dosis de 0, 10, 20, 40 y 80 kg de P ha^{-1} . Se analizaron dos suelos con niveles de 4,3 y 10 ppm según Bray 1. El primero con alto contenido de calcio, pH alcalino y textura franco-limosa, mientras que el segundo presentó pH ácido y textura areno-arcillosa. Se observa que los valores de análisis de suelo disminuyeron drásticamente en el suelo calcáreo después de 4 meses de incubación, en comparación con el nivel inicial, especialmente para las tasas más altas de aplicación de fertilizante, mientras que, para el otro tipo de suelo analizado, los cambios fueron relativamente bajos. A los 8 meses, ambos suelos aumentan el contenido de P y a los 20 meses lo disminuyen. Se destaca que a dosis 0 y 10, los cambios no son significativos.

2.4 LA NECESIDAD DE ESTIMAR LA DOSIS ÓPTIMA DE P NECESARIA EN FUNCIÓN DEL NIVEL INICIAL DE FÓSFORO EN SUELO

Con el objetivo de conformar diferentes categorías de fertilidad del suelo y asociarlas a un requerimiento de fertilizante fosforado determinado para cubrir las necesidades nutricionales del maíz, en cinco localidades de Venezuela, Ramírez et al. (1988), instalaron 47 ensayos de respuesta a la fertilización fosforada. Los suelos fueron franco a franco-arcillo-limoso, pH ácido a neutro y nivel de P inicial variable. Aunque los rangos de P en suelo son muy amplios, los autores concluyen que en los suelos con menos de 4 ppm de P se debería aplicar al menos 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅; en suelos con 4 a 9 ppm de P, entre 45 y 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅; en suelos con 9 a 17 ppm de P, 30 a 45 kg ha⁻¹ de P₂O₅; en suelos con 17 a 25 ppm de P, entre 10 y 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅; y en suelos con más de 25 ppm de P, 10 o menos kg ha⁻¹ de P₂O₅.

Mallarino (2005) en Estados Unidos de Norte América, también evaluó las dosis de P₂O₅ necesarias a aplicar, en función del nivel de P en el suelo y el rendimiento del cultivo. Encontró que para concretar rendimientos de 3360 kg ha⁻¹ en soja y 9400 kg ha⁻¹ en maíz, se necesitaban aplicar desde 40 a 90 Kg P₂O₅ ha⁻¹ cuando el nivel inicial pasaba del óptimo a muy bajo valor en suelo para el cultivo de soja. Para el cultivo de maíz, los valores variaron desde los 55 a los 100 Kg P₂O₅ ha⁻¹. El nivel óptimo considera además, valores de 16-20 ppm para el subsuelo alto en P y 11-15 para el subsuelo bajo en P, mientras que los niveles muy bajos consideran rangos de 0-8 y 0-5 ppm, ambos medidos a una profundidad de suelo de 15 cm.

Howard et al. (2002), para niveles iniciales bajos de P en suelo, para dos sistemas de manejo del barbecho evaluados (sin y con laboreo), durante once años en maíz, bajo suelos de textura franco-limosa, en general el rendimiento en grano para el sistema bajo laboreo, respondieron hasta aplicaciones de 39 kg P ha⁻¹. Para el sistema sin laboreo, la respuesta solo existió hasta los 20 kg P ha⁻¹. Como se esperaba, para la producción de secano, los rendimientos en grano variaron cada año, oscilando entre 5 y 10 Mg ha⁻¹. Sin embargo, la respuesta de los cultivos no pudo correlacionarse con la precipitación. Estos resultados difieren de los reportados más adelante por Gordon et al. (2016), quienes luego de diez años de trabajo, encontraron diferencias significativas en la interacción de dosis por año. A partir del séptimo año, la dosis cercana a 100 kg de P ha⁻¹ superó al resto en al menos una tonelada de rendimiento. A su vez, estos autores analizaron la interacción de la dosis aplicada con el método de aplicación (en banda y al voleo). El análisis estadístico indicó que hubo interacción entre la dosis y el método de aplicación, para aquellos sitios donde se localizó el fertilizante con dosis bajas de 0 y 25 kg ha⁻¹. Sin embargo, Bordoli y Mallarino (1998), no encontraron diferencias entre aplicar el P en banda debajo de la semilla y las aplicaciones al voleo de este nutriente.

A lo largo de las zafas 2004/05, 2005/06 y 2006/07, se instalaron nueve ensayos en total para el cultivo de soja, en Argentina. Según las condiciones edáficas, el contenido de materia orgánica (MO) varió entre 1,4 y 2,5% y los valores de P disponible en suelo (Bray 1; 0-15 cm), variaron entre 8 y 31 ppm donde 5 sitios presentaron un nivel mayor a

18 ppm. Los tratamientos de P agregados fueron: 0, 23, 34.5 y 46 kg P_2O_5 ha⁻¹. Para los sitios de mayor contenido de MO y P- Bray 1, la dosis óptima fue 0, mientras que en los dos sitios con respuesta ésta se alcanzó agregando 23 y 34.5 kg de P_2O_5 ha⁻¹ cuando el contenido de P en el suelo fue de 15 y 12 ppm respectivamente (Espósito et al., 2008).

Otro factor que incide en la variación de la dosis óptima es el pH del suelo. En su estudio sobre la respuesta a la fertilización fosforada en soja, Helget (2016), encontró que dos suelos con niveles iniciales de P Bray 1 (ppm) bajos y muy similares, de textura franco arcillo limosa, alcanzaron respuestas máximas a dosis de 135 kg P_2O_5 ha⁻¹ y 0 kg P_2O_5 ha⁻¹ cuando el pH se situó en valores de 6 y 7.5 respectivamente. Como era esperable, en aquellos sitios con alto o muy alto nivel inicial de P, no existió respuesta al agregado de P. En general, para los sitios restantes, con bajos y medios niveles de P, el agregado de 67 y 90 kg P_2O_5 ha⁻¹, logró cubrir las necesidades de P al cesar la respuesta en rendimiento al agregado de P.

Con el objetivo de calibrar la oferta óptima de P para el cultivo de trigo, se realizaron tres experimentos a campo en distintas localidades de Argentina. Solamente en uno de los sitios hubo incrementos significativos en rendimiento en grano al cambiar el agregado desde 23 kg a 46 kg de P_2O_5 ha⁻¹. Los resultados principales muestran que la dosis mínima para obtener el máximo rendimiento (5000 kg ha⁻¹) fue de 27 kg P ha⁻¹, cuando el nivel inicial de P Bray 1 se situó entre 8 y 11 ppm (Ascheri, 2007).

Si bien la evidencia muestra que los trabajos de investigación en distintas partes del mundo, se ha orientado hacia definir dosis óptimas que cubran las necesidades nutricionales para diferentes cultivos y ambientes, no se han definido modelos que permitan establecer una relación sólida entre las dosis de P necesaria y el nivel disponible de P en suelo, que posibiliten resolver una situación de deficiencia fosforada independientemente de la evolución en el suelo en el corto plazo.

2.5 HIPÓTESIS DEL TRABAJO

- Los niveles críticos de P no varían entre cultivos, clases texturales u otras características del suelo.
- La relación entre las dosis óptimas y el nivel de P disponible no se modifica según el P inicial del suelo, ni la textura, de los suelos dominantes bajo agricultura
- La relación entre las dosis óptimas y el nivel de P disponible no cambia para los diferentes cultivos anuales para grano.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 REVISIÓN DE ENSAYOS DE FERTILIZACIÓN FOSFORADA EN URUGUAY

Para poder cumplir con los objetivos del trabajo, se procedió a revisar exhaustivamente toda la información disponible en cuanto a resultados de investigación publicados en todos los formatos, de forma de elaborar una base de datos acerca de la fertilización fosforada en cultivos de grano en Uruguay.

3.1.1 Procedimientos de búsqueda y recopilación de datos

3.1.1.1 Fuentes de información

La búsqueda de información en primer término buscó acceder a los artículos científicos, técnicos y de divulgación sobre el tema en estudio, que se hayan realizado en Uruguay. Luego se exploraron sitios web de instituciones como INIA, FUCREA y Plan Agropecuario, y la biblioteca de la Facultad de Agronomía, con el fin de ubicar cualquier trabajo relacionado con la respuesta al P en cultivos anuales para grano. Finalmente, se realizaron búsquedas en la biblioteca universitaria para obtener documentos en formato impreso. Como resultado principal se pueden citar las siguientes fuentes: tesis de grado, revistas científicas, memorias de jornadas técnicas, notas técnicas, boletines técnicos, informes de red de experimentos, congresos, simposios y reportes de proyectos.

El objetivo fue lograr completar una base de datos con el mayor número de ensayos posibles, los cuales debieron cumplir con ciertos requisitos.

3.1.1.2 Estructura de la base de datos

Para elaborar la base de datos se dividió según el tipo de información disponible, la cual varió desde información general, hasta detalles de diseño y análisis estadístico de los estudios revisados.

A continuación, se especifica la composición de toda la información que se buscaba recopilar de cada experimento de respuesta al P:

- Información general: código de identificación, autores, año de publicación y localidad.
- Características de suelo: unidad de suelo, clase textural, nivel inicial de P (P Bray-1) y pH.
- Manejo: cultivo, fecha de siembra, labranza, riego y antecesor.
- Condiciones climáticas: distribución de la temperatura media y precipitaciones durante el ciclo de cultivo.
- Fertilización: fuente y dosis.
- Variables: rendimiento en grano.

- Resultado estadístico: significancia.

Otros: fecha de muestreo de suelo, fecha de fertilización y profundidad del análisis de suelo.

3.1.1.3 Criterios de selección de ensayos

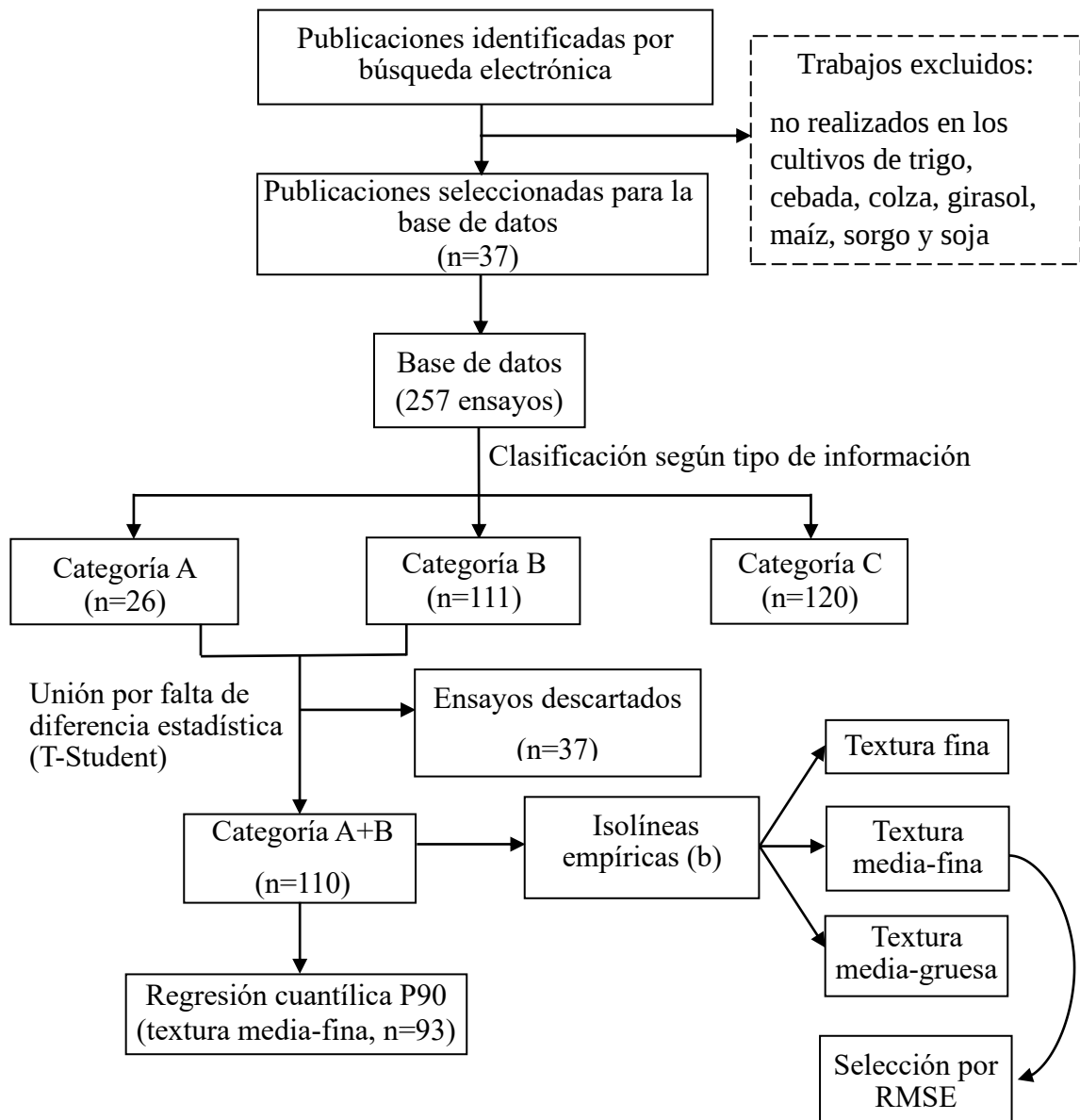
Debido a que el grado de detalle informado de los experimentos respecto a las necesidades descriptas en el punto anterior resultó muy variable, para formar parte de la base de datos efectiva a interpretar posteriormente, fueron definidas tres categorías o clases, en función de la calidad de la información (clases A, B y C). Para que un experimento integrara la clase más completa (categoría A), debió cumplir los siguientes requisitos:

- a. Especificar la ubicación geográfica (país y región) y temporal (año o zafra).
- b. Mencionar el/los cultivo/s en estudio.
- c. Contar con un valor de análisis de suelo para P en el estrato superficial, preferentemente cercano a la fecha de siembra y su respectivo método de extracción.
- d. Contar con no menos de tres dosis de P, donde una de las dosis de P, debe ser la del testigo sin P.
- e. Especificar la fuente del fertilizante utilizada.
- f. Presentar un análisis estadístico de los datos obtenidos.

Los restantes ensayos (los cuales no cumplieron con los requisitos anteriores), fueron asignados en categorías de inferior calidad (categorías B y C) y fueron utilizados para describir y caracterizar todo el trabajo de investigación sobre la fertilización fosfatada en el tiempo, el espacio a nivel nacional. En la categoría B se ubicaron experimentos con los mismos requisitos que la categoría A, a excepción de que la respuesta en rendimiento fue estimada a partir de distintas ecuaciones, mientras que, en la categoría C se incluyen a los experimentos con información incompleta (sin datos de análisis de suelo, fuente de fertilizante, función ajustada o análisis estadístico) o con un número de dosis menor al necesario para definir en forma precisa la dosis óptima.

3.2 ESQUEMA DE PROCESOS Y RESULTADOS

El diagrama de la Figura 1, presenta las etapas del proceso desde la colección de datos hasta llegar al resultado que permitió cumplir los objetivos planteados inicialmente.



n- número de publicaciones y ensayos; categorías A, B y C- distintos niveles de calidad de la información; RMSE- Root Mean Square Error; P90- Percentil 90%; b- coeficiente de la evolución de la dosis óptima de P agregado en función de la disminución de P disponible en suelo por debajo del nivel crítico (14 ppm).

Figura 1. Modelo simplificado de etapas y procesos de la investigación

Luego de obtener la base de datos dividida en categorías según la cantidad y calidad de información, se realizó una comparación de medias con la variable rendimiento relativo (%) para unir las categorías A y B y poder analizar los datos posteriormente, con una base más amplia y sólida, ya que los ensayos de la categoría A presentaban una proporción muy pequeña del total de los experimentos relevados. Se descartaron sitios de la categoría B, donde la ecuación ajustada estimó dosis mayores a 400 kg ha^{-1} . Para este análisis, donde fue necesario definir la dosis óptima, no se tomaron en cuenta los ensayos de la categoría C, ya que carecían de información fundamental (nivel de P en suelo, fuente de fertilizante, análisis estadístico) o presentaban datos inconsistentes (valores extremos de P en suelo o respuestas muy elevadas cuando los niveles de P en suelo eran muy elevados). Estos sitios se utilizaron para describir la historia de la fertilización fosforada, y para calcular los niveles críticos cuando la información permitió llegar a un dato de rendimiento relativo.

A partir de los 110 ensayos resultantes, se graficaron isolíneas empíricas con valores de b arbitrarios desde 3 a 13 para cada grupo de clase textural (fina, media-fina, media-gruesa) para estudiar la evolución de la dosis en función del nivel de P en suelo. Solamente se utilizaron los sitios con textura media-fina, por presentar mayor número de datos y una distribución adecuada de los sitios a lo largo de los distintos valores de P en el suelo. El criterio de selección de la isolínea con mejor ajuste fue el de RMSE, con el fin de obtener el coeficiente b que mejor se adapte al conjunto de datos. Este indicador de ajuste estima el desvío estándar de un modelo de regresión para estimar la variabilidad natural y se calcula a través de la raíz cuadrada de la diferencia entre el rendimiento observado y el estimado para cada punto dentro de un conjunto. Es independiente de la localización del sitio y sus características, y está muy asociado al tamaño del conjunto estudiado (Gasó et al., 2019). Aun así, la precisión se mantuvo baja, en la medida que una gran cantidad de sitios se apartaban de la relación general. Por ello se decide estudiar el ajuste de un modelo de regresión cuantílica para el percentil a 90% que define las dosis máximas necesarias a utilizar, ante condiciones de deficiencia de P en suelo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN NACIONAL

En esta revisión se lograron encontrar 37 publicaciones, con un total de 257 experimentos de respuesta al P. La caracterización de la información se presenta a continuación.

Cuadro 1. Número y proporción de los experimentos de la base de datos, que incluye información clasificada según características del suelo y manejo de la fertilización

	Experimentos	Proporción
	(No.)	---%---
Nivel inicial de P	229	89
Textura	181	70
Fm, GC o tipo de suelo*	154	60
pH	100	39
Fuente	227	88
Localización	151	59
Fecha de aplicación	157	61
Fecha de muestreo	56	22
Total	257	100

*Fm de suelo= Formación de suelo, GC= Grupo CONEAT.

No.: número.

Del total de los experimentos, 11% no contaron con información del nivel de P en el suelo. A su vez, para el 30 % no existe información precisa sobre textura del suelo, una variable imprescindible para analizar la respuesta al P, en la medida que los niveles críticos cambian con ella (Schlindwein 2003, Cubilla 2005). Otro variable relevante a la hora de analizar la respuesta al P, es la textura, en a la medida que las referencias críticas cambian con ella (Schlindwein 2003, Cubilla 2005), solo el 40% de los experimentos omitieron identificar la Fm o tipo de suelo. En algunos casos, la Fm y el pH podrían haber sido útiles para entender en mayor medida los desajustes observados, pero más de la mitad de los experimentos (61 %) no incluyeron el dato de pH. Según Hernández (2010), el pH del suelo está directamente relacionado con la forma iónica de ortofosfatos en solución, que determina la disponibilidad de P para las plantas. Hay evidencias de que un exceso de aluminio en solución en suelos fuertemente ácidos induce una deficiencia de P, ya que está asociado a bajas concentraciones de P. Esta deficiencia también es causada en suelos de pH alto, donde el P se une principalmente con el calcio afectando la solubilización de compuestos fosfatados.

En cuanto al manejo de los cultivos, en este caso la descripción es deficiente. El 19% carece de fechas de siembra y un porcentaje mayor a 40% no presentan densidad ni método de siembra. Es notorio que, en la mayoría de los experimentos se desconoce la historia de la chacra y el antecesor. Aproximadamente el 50% de los experimentos recibieron una fertilización adicional de otros nutrientes como nitrógeno, azufre y/o potasio.

Los datos acerca de las condiciones climáticas durante el desarrollo del cultivo, es muy deficiente y solo existe 15% y 27% de información en cuanto a temperatura y precipitaciones, respectivamente.

Importa destacar que todos los experimentos fueron realizados a campo, sin encontrarse ensayos bajo condiciones controladas.

4.1.1 Distribución geográfica de los experimentos

Los ensayos estuvieron distribuidos en un total de 13 departamentos (Figura 2). Aproximadamente el 60% se ubicó sobre el Litoral Oeste del país (Colonia, Soriano, Río Negro y Paysandú), el 15 % en el Centro y Sur (San José, Durazno y Canelones), el 11% en el Este (Treinta y Tres, Lavalleja y Rocha) y el 15% restante en el Noreste (Tacuarembó, Cerro Largo y Rivera).

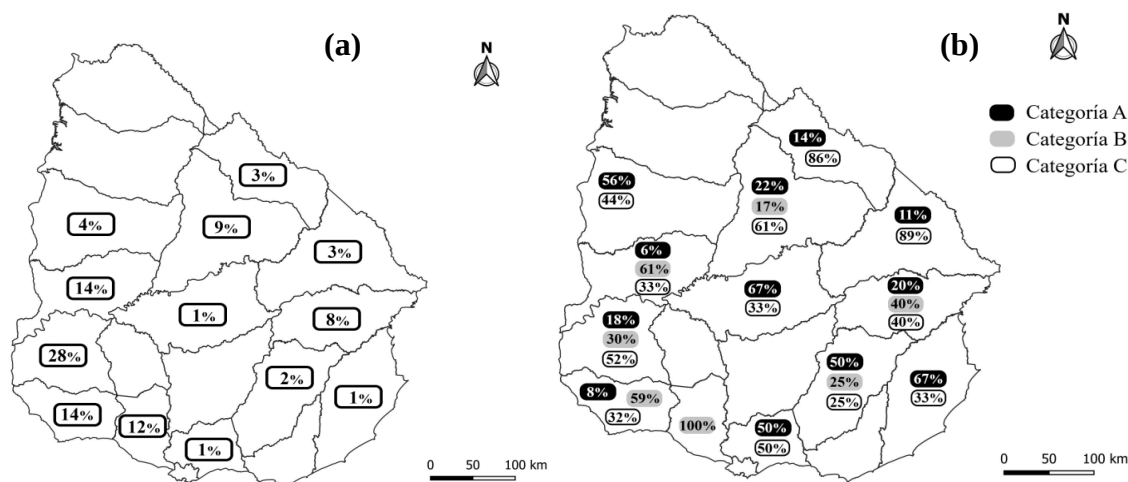


Figura 2. Proporción de sitios por departamento con relación a todos los experimentos que componen la base de datos sobre fertilización fosforada en Uruguay (a) y la proporción de cada categoría de experimentos con relación al total de cada departamento (b)

Como era esperable la mayor proporción de los experimentos de respuesta al P se instalaron en el Litoral Oeste, coincidente con ser la región más especializada en agricultura de secano, asociada a los suelos más aptos. A medida que los cultivos se expanden fuera de esta zona hacia el Centro y Sur, la actividad agrícola disminuye con relación a las áreas dedicadas a la ganadería y la lechería (MGAP, 2015). Además, al igual que para la zona Noreste y Este, en estas zonas se observa el peso de la ubicación de las áreas experimentales de instituciones de investigación (INIA, ex CIAAB, FAgro).

4.1.2 Ubicación temporal

El período de publicación estuvo comprendido entre los años 1969 y el 2014, con una mayor intensidad a partir de 1981 (Cuadro 2). Si bien existen trabajos publicados anteriores a esta fecha, fue imposible localizarlos. Además, existen trabajos de investigadores, mencionados que no han sido publicados.

A partir de los años 60, en el CIAAB en la estación experimental La Estanzuela junto con la Facultad de Agronomía, iniciaron un conjunto de experimentos para evaluar la respuesta de los cultivos a distintos nutrientes (entre ellos el P), y elaborar recomendaciones de fertilización. Con la información generada se creó la Guía para Fertilización de Cultivos (Oudri et al., 1976) del CIAAB (García, 2009). Al mismo tiempo, se amplió el enfoque de la investigación hacia el mejoramiento de los cultivos, con el fin de lograr una mayor producción agrícola. Entre las disciplinas involucradas, la nutrición de los cultivos tuvo una gran incidencia en la época (Alburquerque, 1969).

Entre los años 1980 y 1990, los objetivos de la investigación sobre la fertilización fosforada fueron muy variables y abarcaron ensayos de respuesta al P, calibración de distintos métodos de análisis, análisis de fuentes de fertilizante y mezclas de distintas fuentes, efecto residual del encalado a distintas dosis de P, impacto de la localización y ensayos de fertilización para distintos híbridos. Además, se estudió la interacción del P con otros nutrientes como nitrógeno, potasio y azufre. A partir de 1996, comenzaron a realizarse ensayos sobre respuesta al P bajo condiciones de no laboreo. En 2004, 2006 y 2010 los trabajos se orientaron a evaluar la respuesta al P para suelos con distintos niveles de fertilidad y ambientes de menor o mayor potencial productivo (Almada 2006, Otaño et al. 2010, Coitiño 2011).

Al final del período relevado, las publicaciones estuvieron orientadas hacia el efecto residual de la fertilización fosforada y el agregado de este nutriente en cultivos de segunda, principalmente soja.

Cuadro 2. Publicaciones revisadas y ensayos instalados en Uruguay por período, según cultivo, desde 1969 hasta 2014

Cultivo	1965-1980		1981-2000		2001-2014	
	No.	%	No.	%	No.	%
Maíz	3	5	3	2	1	1
Sorgo	2	5	5	2	0	0
Soja	3	7	12	12	5	12
Girasol	1	1	2	1	0	0
Trigo	1	34	3	9	3	1
Cebada	0	8	1	0	1	0
Total por período	10	60	26	26	10	14

No.= número de publicaciones, %= proporción de ensayos

*El número total es mayor al número de publicaciones, ya que, en algunos casos, las mismas estudiaban más de un cultivo.

El período de instalación de los ensayos comenzó en el año 1962 y se extendió hasta el año 2011. A diferencia de las publicaciones, el período con mayor proporción de ensayos se dio en 1962-1980 debido al aporte de una red de ensayos realizada con el fin de calibrar distintos métodos de análisis de suelo (Pérez-Sanabria et al., 1981).

A continuación, se puede observar la evolución de las publicaciones revisadas y los ensayos instalados en términos de tiempo (Figuras 3 y 4).

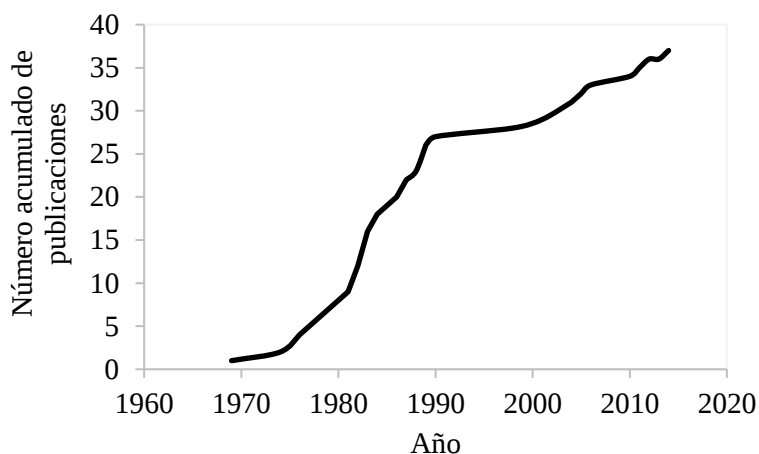


Figura 3. Evolución del número acumulado de publicaciones sobre respuesta al agregado de fósforo en Uruguay, para cultivos extensivos

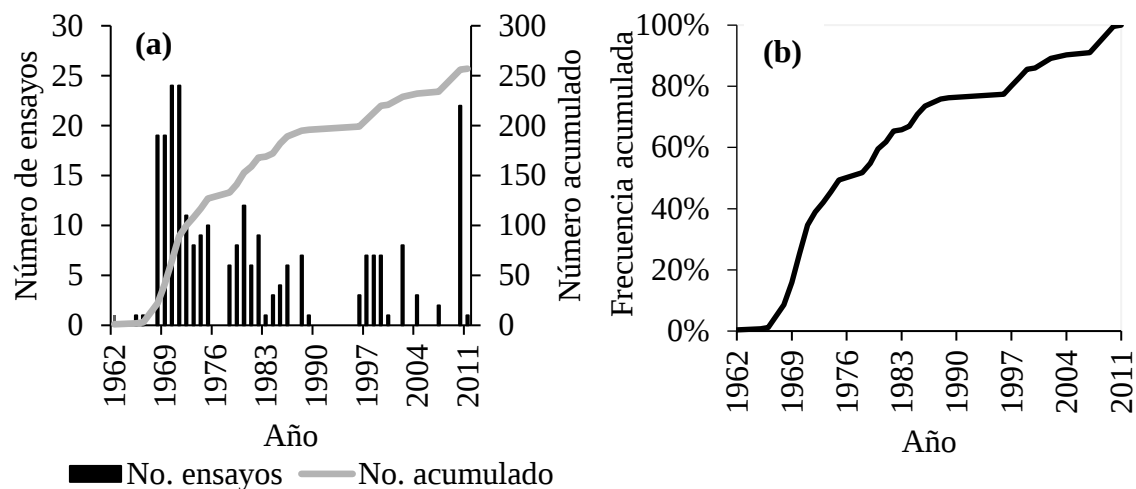


Figura 4. Número de ensayos por año y acumulado (a), y frecuencia acumulada en % (b) de todos los experimentos que componen la base de datos, desde 1962 hasta 2011

Como se observa en la Figura 4, hasta el final de la década de los 60, el total de experimentos de los trabajos relevados representaron el 16%, mientras que la mayor concentración se da entre la década del 70 y el 90, donde se alcanza casi el 80% del total de los experimentos realizados e identificados. Posteriormente hasta 2011, se concentró el 20% restante.

La ausencia de trabajos publicados desde 2014 hasta la actualidad, no indica necesariamente la falta de investigación en el tema, sino que no se lograron ubicar nuevos trabajos publicados. Aunque se podría pensar que la frecuencia de experimentos de respuesta a P, seguramente sea muy baja.

4.1.3 Descripción de las principales características del suelo

Los datos acerca del tipo de suelos se especificaron en 174 de 257 experimentos totales y comprendieron cinco órdenes: Brunosoles (85%), Vertisoles (9%), Argisoles (3%), Planosoles (2%), y Luvisoles (1%) según la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (MAP. DSF, 1976).

Con relación a la acidez, se formaron cuatro categorías a partir de los 100 ensayos con información de pH: fuertemente ácidos (pH menor 5.0), ácidos (pH 5.0 a 6.4), neutros (pH 6.5 a 7.4) y alcalinos (pH 7.4 a 7.8), que representarían el 9%, 86%, 4% y 1% del total de ensayos, respectivamente. Esta clasificación se resumió en función de la utilizada por MAP. DSF (1976).

La clasificación textural se agrupó en cuatro categorías principales, fina, media y gruesa, y un grupo adicional denominado fina a media, asignado en aquellas

publicaciones con varios sitios analizados donde no se especificó la textura particular de cada sitio, sino que figura una descripción general. El total de ensayos que presentaron información de textura, fueron 229 y su distribución se presenta en la Figura 5.

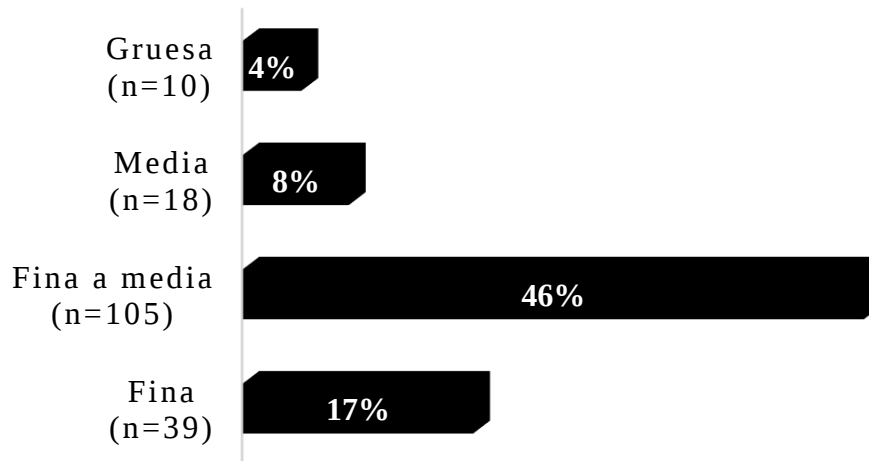


Figura 5. Proporción de sitios experimentales para cada clase textural

Como se puede observar en la Figura 5, aproximadamente la mitad de los sitios experimentales se instalaron sobre suelos de texturas medias a finas, donde no se tiene certeza de la proporción correspondiente a cada clase, y se puede observar la falta de sitios sobre suelos de textura gruesa, donde se esperan mayor respuesta al agregado de P (Labella y Améndola 1977, Schlindwein 2003, Cubilla 2005).

4.1.4 Caracterización de los niveles de fósforo en suelo

El nivel de fertilidad fosforada en los suelos bajo estudio varió entre un mínimo de 1 ppm y un máximo de 70 ppm, medido con el método de Bray1, a excepción de un solo sitio determinado con ácido cítrico. El valor promedio se ubicó en torno a 9 ppm, con un 65% de los casos entre 2 ppm y 10 ppm. La profundidad de muestreo dominante fue de 0 a 15 cm para 64% de los ensayos, 0 a 20 cm para 31% de los ensayos y 0 a 30 cm para el 5% restante. En cuanto a la fecha de muestreo, si bien la información es muy escasa, el 90% realizó muestreos a siembra o previo a la siembra y en el resto varió desde 30 a 140 días de anticipación. Solamente en un solo caso, se realizó el muestreo posterior a la cosecha del cultivo.

Con respecto a la textura, no se observó una relación clara entre las clases texturales y la distribución de los valores de P-Bray I en suelo (Cuadro 4), con una gran superposición de niveles de P entre las distintas clases y así como para aquellos ensayos que no presentaron información de textura, especialmente en los niveles más bajos. Sin embargo, la textura fina tiende a disminuir de manera más gradual el número de ensayos a medida que aumenta el nivel de P en el suelo. A su vez, el bajo número de sitios

experimentales para las categorías media y gruesa se convierte en una limitante para los objetivos de este trabajo. Igualmente, la mayoría de los experimentos están concentrados en valores de P disponible en suelo inferiores a 8 ppm, aunque hay algunas diferencias por textura (salvo en la gruesa).

Cuadro 3. Distribución de los niveles de P Bray-1, según las clases texturales de suelo, para los ensayos de fertilización fosforada en Uruguay relevados

Rango de P	Nivel	Fina		Fina a media		Media		Gruesa		Sin textura	
		No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%
< 6 ppm	Muy bajo	15	38	46	44	7	39	5	50	22	39
6 - 8 ppm	Bajo	10	26	17	16	6	33	-	-	6	11
8 - 10 ppm	Medio	6	15	10	10	-	-	-	-	9	16
10 - 14 ppm	Medio-alto	5	13	12	11	5	28	3	30	7	12
14 - 18 ppm	Alto	2	5	7	7	-	-	1	10	7	12
> 18 ppm	Muy alto	1	3	13	12	-	-	1	10	6	11
	Total	39	100	105	100	18	100	10	100	57	100

4.1.5 Descripción del manejo del cultivo

Del total de experimentos, 33% mencionó el sistema de manejo del laboreo o el suelo, en donde el 74% se llevó a cabo bajo siembra directa y el 26% restante se sembró bajo laboreo convencional. Los experimentos bajo siembra directa son más recientes en comparación a los realizados bajo laboreo, y se realizaron desde 1996 en adelante.

Para los cultivos de invierno, las fechas de siembra se ubicaron entre el 15 de mayo y el 25 de agosto, con una mayor concentración entre julio y principios de agosto. Para los cultivos de verano, la fecha de siembra más temprana fue desde el 29 de agosto y la más tardía el 23 de diciembre, con el 50 % de los ensayos sembrados en el mes de noviembre. Solamente en un 47% de los ensayos se logró definir si se trataba de un cultivo de primera o de segunda, representando el 88% y el 22% respectivamente.

Con respecto al antecesor, fue mencionado solo en el 23% de los ensayos, y varió desde campo natural, rastros de uno, dos y tres años, verdeos de invierno (avena y raigrás), praderas viejas, a cultivos como arroz, maíz, soja, trigo y cebada.

Aproximadamente la mitad de los ensayos, recibieron fertilización adicional de otros nutrientes como nitrógeno, azufre y/o potasio, con el fin de evitar limitaciones nutricionales adicionales al P.

4.1.6 Descripción del manejo de la fertilización fosforada

Todos los ensayos de la base de datos considerada contaron con un tratamiento testigo (sin agregado de fertilizante) y el número de dosis adicionales varió desde uno hasta seis, con una distribución de 4%, 16%, 22%, 46%, 11% y 1% respectivamente. Las dosis aplicadas variaron en función de los tratamientos, con un mínimo de 10 kg P_2O_5 ha⁻¹ hasta un máximo de 240 kg P_2O_5 ha⁻¹.

Respecto a las fuentes de fertilizante, en un 76% de los ensayos, se utilizaron superfosfato de calcio (SFC, 0-23/21-0), un 20% utilizó superfosfato triple (SFT, 0-46/46-0), un 3% utilizó fertilizantes binarios (11-52-0-0, 25-33-33-0 y 18-46-46-0) y el restante 1% utilizó fosfato diamónico (FDA, 18-46-0). A su vez, en 4 de los ensayos se realizó un estudio comparativo de fuentes fosfatadas.

Se pudo identificar que al voleo con posterior incorporación al suelo fue la forma de localización de un 70% de los ensayos, al surco para un 33%, y al voleo sin incorporación para un 9%. Solamente dos de las publicaciones revisadas, evaluaron el efecto de distintos métodos de aplicación, una de ellas comparó al voleo vs línea, y la otra comparó aplicaciones en línea, con cincel, con disquera, con arado y combinaciones de estas dos últimas.

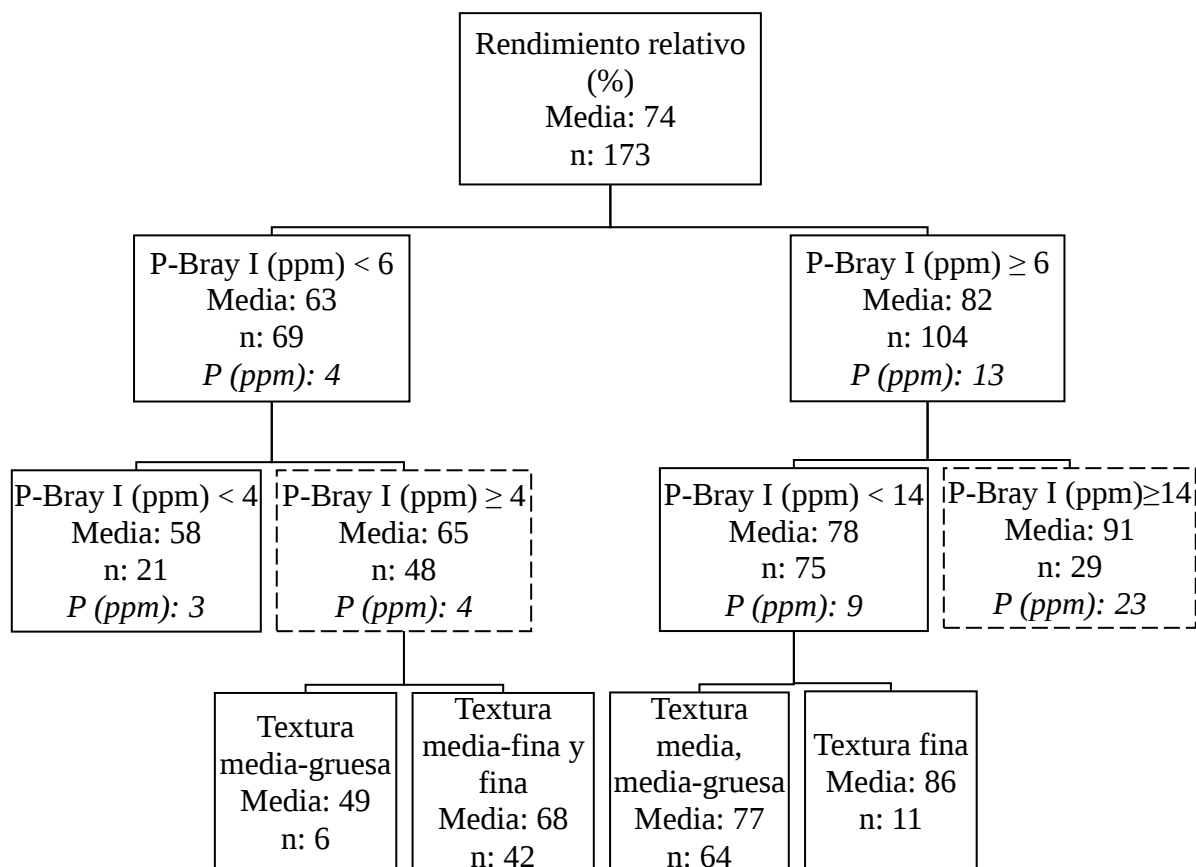
En cuanto al momento de aplicación, 64% de los ensayos la fertilización fue previa a la siembra, 27% a la siembra y 8% anticipada (desde 7 días hasta más de un mes). No se reportaron publicaciones que evalúen diferentes momentos de aplicación.

4.1.7 Respuesta vegetal al agregado de fósforo

Para poder analizar la respuesta al P y posteriormente comparar los resultados entre sí con independencia de otros factores, se transformaron los valores absolutos en rendimientos relativos al testigo sin P. Este se calculó como la relación entre el rendimiento de los tratamientos testigos, sin fertilizar y el rendimiento máximo obtenido de los tratamientos fertilizados. Del total de experimentos, un 80% presentó respuestas desde 10 a 30%, seguido por un 32% con respuestas desde 30 a 50%, y solamente un 11% presentó respuestas mayores a 50%. La respuesta en este caso queda definida como el incremento en rendimiento por sobre el testigo.

Mediante método de partición recursiva se elaboró un árbol de clasificación y regresión, permitiendo identificar grupos de comportamiento diferencial, determinados principalmente por el nivel de P disponible en el suelo. Cada partición está asociada a una de las variables consideradas para el análisis, y a un valor propio de la unidad que particiona el grupo mayor en dos subgrupos cuando encuentra diferencias significativas. Esto permitió estudiar los factores asociados con la variación en la respuesta al P (Figura 6).

Para la elaboración de este árbol, se incorporaron aquellas variables que se espera estén asociadas con la respuesta al P, tales como nivel inicial de P disponible en suelo, textura, fuente de fertilizante, localización del fertilizante y cultivo. Como se detallará a continuación, estas últimas tres no calificaron como variables relevantes.



n- número de datos que abarca cada grupo; P (ppm)- valor promedio de fósforo para cada grupo. *Cabe destacar que el LogWorth sería el $-\log_{10}$ de p valor. Valores mayores a este indican que existe significancia estadística, por ende, justifica otro agrupamiento a un nivel inferior.

Figura 6. Árbol de clasificación y regresión-CART (Classification and Regression Tree), que describe la relación entre el rendimiento relativo expresado en función del rendimiento máximo y las principales variables asociadas a la respuesta vegetal al agregado de P

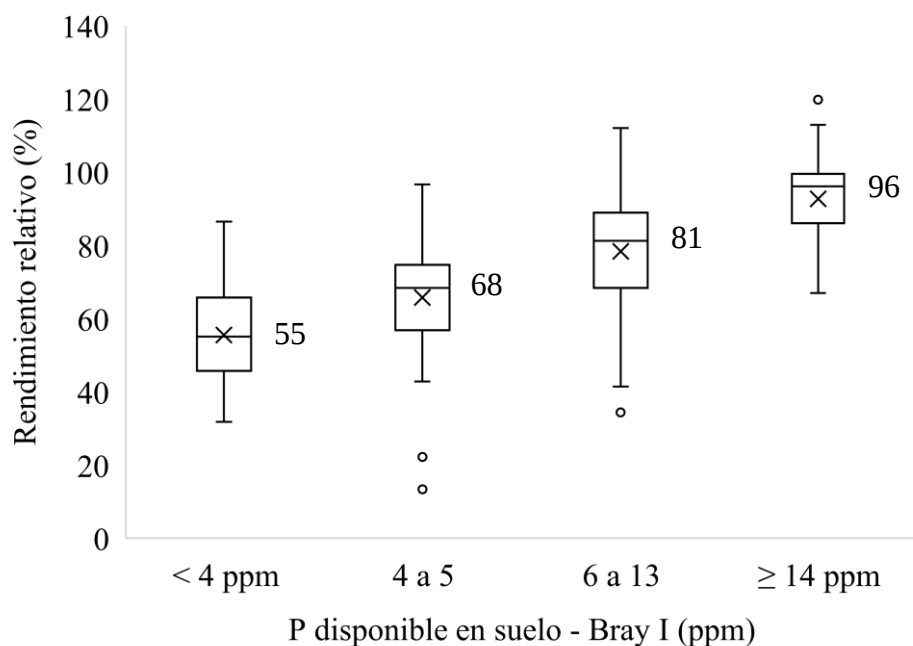
Las principales variables que explicaron la respuesta al P fueron dos. En primer lugar, se destaca el nivel inicial de P en el suelo, con una división en dos grandes grupos a partir de un valor bajo de 6 ppm. El rendimiento relativo adquiere valores promedios de 63%, siendo el de mayor valor dentro de las agrupaciones obtenidas cuando el nivel inicial

de P en suelo fue menor a 6 ppm, mientras que cuando es mayor o igual, disminuye la respuesta al P, aumentando significativamente el rendimiento relativo promedio al de 82%. Esto coincide con lo reportado por Chebataroff et al. (1985), quienes, para sitios con un nivel de P de 5 a 7 ppm, tanto en campos nuevos como provenientes de rastrojo, encontraron las mayores respuestas a la aplicación de P, las cuales cesaron cuando el nivel inicial se encontraba en torno a 13 ppm. Igualmente, para las condiciones de producción de Uruguay Bordoli et al. (2004), señalaron al nivel de P en suelo como primer factor en determinar respuestas significativas en rendimiento.

Para aquellos sitios que presentaron menos de 6 ppm en el suelo, nuevamente se destaca como factor de importancia el nivel inicial de P disponible, donde se marca una diferencia a partir de valores de P en suelo muy bajos (4 ppm). A su vez, el grupo que engloba experimentos con valores iguales o mayores a 4 ppm se subclasifica según la textura del suelo, con diferencias significativas en rendimiento relativo (19%), a favor de la clase textural media-gruesa. Cubilla (2005) encontró valores de rendimiento relativo (definido como el rendimiento del testigo sobre el rendimiento máximo) de 62, 52 y 56% para sitios con valor inicial de P en el suelo de 3, 4 y 5 ppm respectivamente. Además, encontró respuesta significativa al agregado de P en suelos con 350 g kg⁻¹ de arcilla y bajos niveles iniciales del nutriente en el suelo, en contraste con aquellos sitios con 475 g kg⁻¹ de arcilla y niveles altos de P inicial, los cuales no presentaron respuesta al agregado.

Por último, los sitios que presentaron un nivel de P en suelo igual o mayor a 6ppm tuvieron en general respuesta menor al agregado de P y se dividieron en dos grupos a partir de un nivel alto de P en suelo (14 ppm), coincidente con el nivel crítico general encontrado posteriormente al analizar el conjunto de datos de la base de datos. En los sitios con menos de 14 ppm de P en suelo, hubo una subclasificación en función de la textura, donde la clase fina presentó menores respuestas en comparación con las clases medias y gruesas, el cual se reflejó a través de un 9% de diferencia en el rendimiento relativo. Una situación similar fue registrada en los trabajos de Chebataroff et al. (1985), Morón (2003), Boxler et al. (2006), donde la respuesta al agregado de P cesa cuando el valor inicial en el suelo es igual o mayor a 13 ppm. A su vez es esperable encontrar respuestas menores cuando la textura del suelo es fina (Schlindwein 2003, Cubilla 2005).

La evolución del rendimiento relativo medio en función del P en el suelo para cada grupo de partición que generó el árbol de clasificación y regresión se presenta en la Figura 7.



La línea horizontal dentro de cada box plot junto con el número indica el valor de la mediana para cada grupo de P disponible.

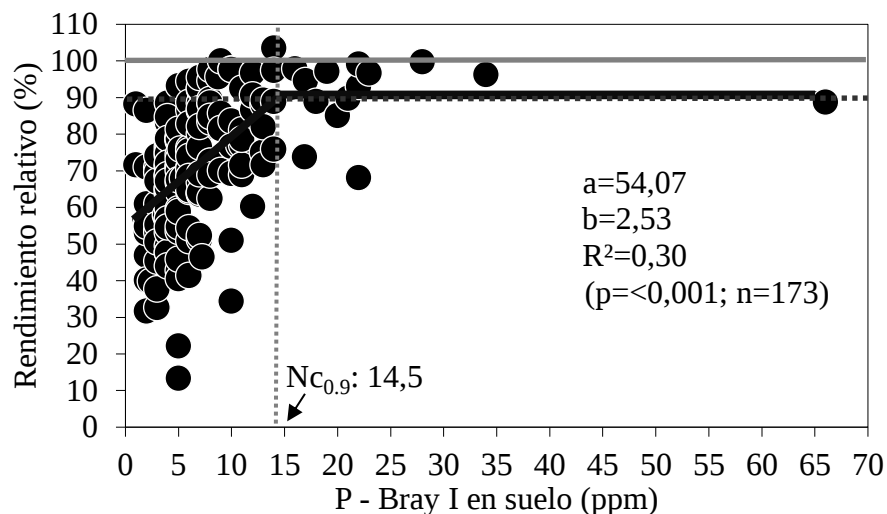
Figura 7. Relación entre el rendimiento relativo expresado en función del rendimiento máximo, y los grupos de fósforo disponible en el suelo de las cuatro bases que generó el árbol de clasificación y regresión

Como era esperable, la mayor respuesta al P se encuentra en los niveles más bajos de P en suelo, disminuyendo cuando la disponibilidad aumenta (Dodd y Mallarino, 2005). El modelo logró separar ambientes muy deficientes e identificar la ausencia de respuesta cuando el fosforo en el suelo coincidió con un nivel crítico general para todos los cultivos de 14 ppm aproximadamente. Si bien no se encontraron referencias bibliográficas que apoyen a este valor como un nivel crítico general, se sitúa entre los valores reportados de 14 a 16 ppm para maíz y sorgo (Quincke et al., 2008), 13 ppm para soja (Melgar et al. 1995, Barbagelata et al. 2002, Ferrari et al. 2005) y es inferior para lo reportado en trigo donde se señalaron valores cercanos a 19 ppm (Gutiérrez et al. 2010, Sucunza et al. 2018). Además, se encuentra entre los valores de 12 y 15 ppm asignado para texturas con diferente contenido de arcilla, mencionados por Cubilla (2005).

La mayoría de los sitios se ubican entre los grupos con fosforo en el suelo de 4 a 5 y 6 a 13, donde se encuentra la mayor variabilidad. Esto refleja que, si bien el nivel de P inicial es la primera variable en determinar la magnitud de la respuesta vegetal, no la explica en su totalidad. Según el árbol de clasificación y regresión, el nivel de P en el suelo explica un 32% de la variabilidad total.

4.2 RELACIÓN ENTRE EL RENDIMIENTO RELATIVO Y EL P INICIAL EN SUELO

Se seleccionó un modelo de tipo lineal plateau para describir la relación entre el rendimiento relativo y el nivel de P en el suelo (Figura 8). Si bien el ajuste (R^2) no mostró un cambio significativo en comparación con el modelo cuadrático-plateau, este último tendió a sobreestimar el nivel crítico de los cultivos de invierno y verano debido a una baja frecuencia en niveles altos de P en suelo, y a un número insuficiente de datos cuando se intentó separar entre gramíneas y leguminosas dentro de los cultivos de verano.



Los máximos niveles de respuesta son aquellos donde se obtiene el valor más alto rendimiento, con un valor posterior igual o menor al aumentar la dosis aplicada.

Figura 8. Relación entre rendimiento relativo (RR) y P - Bray I del suelo (ppm) de todos los sitios experimentales, para los máximos niveles de respuesta, independiente del tipo de cultivo

Se observa que el nivel crítico general identificado es de 14,5 ppm, nivel por debajo del cual es esperable obtener respuesta en rendimiento en grano al agregado de P. Este valor toma como referencia un rendimiento relativo de 90%, donde se logra el plateau y la respuesta al P ya no cambia.

Al comparar los niveles críticos entre cultivos de invierno y de verano (Figura 9), no se identificaron diferencias, y se situó en un valor de 14,2 ppm. Si bien hay sitios que se apartan de la relación general, sobre todo para los cultivos de verano, sería poco probable encontrar aumentos de rendimiento en grano por el agregado de P, si el valor de P en suelo es mayor al nivel crítico mencionado. Esto difiere de los valores obtenidos a nivel nacional, donde se reportan niveles críticos cercanos a 12 ppm en soja, 14-16 ppm en maíz y sorgo (Quincke et al., 2008), y 12 ppm en trigo (Capurro et al. 1982, Hernández

1999). Los trabajos de Gutiérrez (2010), Sucunza et al. (2018), en Argentina muestran niveles muy superiores para el cultivo de trigo, con relación al maíz y a la soja, con niveles críticos de 19 ppm.

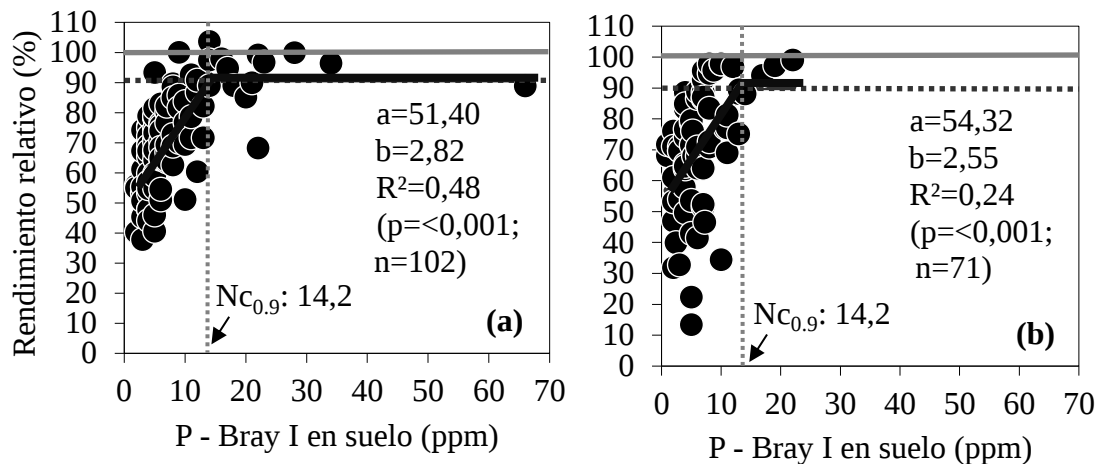


Figura 9. Relación entre rendimiento relativo y P - Bray I del suelo (ppm) en cultivos de invierno (a) y verano (b) para los niveles máximos de respuesta

Se puede observar que los coeficientes a y b de la regresión, presentaron valores similares entre cultivos de invierno y verano. Esto indicaría que no es esperable encontrar diferencias entre la respuesta al agregado de P entre cultivos de invierno y de verano. Según estos resultados, no se justificaría disponer de un modelo de fertilización fosforada en forma diferencial para los cultivos de invierno y de verano. Sin embargo, en los cultivos de verano hay casos con rendimientos relativos menores a 40 %, los cuales indicarían una mayor respuesta. Estos casos corresponden principalmente al cultivo de soja.

Por otro lado, el R^2 para el modelo de cultivos invernales es mayor que el de los cultivos estivales (48% y 24%, para los cultivos de invierno y verano, respectivamente). Debe considerarse que la mayoría de los sitios de cultivos invernales son de trigo, mientras que los cultivos estivales son de maíz, sorgo, soja y girasol. Es decir, se abarca más de un cultivo cuyos metabolismos y potencial de rendimiento en grano, difieren entre sí.

A su vez, la textura mostró ser otra variable que genera diferencias en cuanto a la respuesta al agregado dentro de los cultivos de verano (Figura 10), resultando en valores críticos de 14 ppm y 8 ppm para la textura media-gruesa y fina respectivamente.

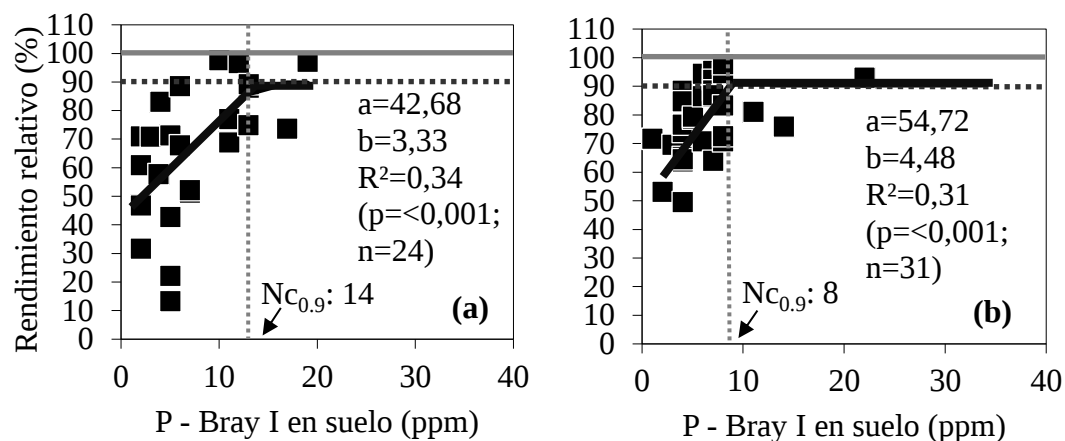


Figura 10. Relación entre rendimiento relativo (RR) y P - Bray I del suelo (ppm) en cultivos de verano para textura media gruesa (a) y fina (b) en función de los niveles máximos de respuesta

Los experimentos realizados sobre suelos de textura fina en un 35% son suelos vertisólicos sobre Libertad, instalados en el año 1972, seguido por un 19% o en Soriano entre el año 2002 y 2007, un 13% sobre Colonia entre el año 1978 y el 2002, y una proporción muy baja sobre Tacuarembó y Paysandú para los años 1974 y 2002 respectivamente.

El contenido de arcilla del suelo, dada su influencia en la extracción de P disponible para las plantas, es uno de los principales factores considerados para elaborar recomendaciones de fertilización fosforada (Siqueira et al. 1987, Mielniczuk et al., citados por Cubilla 2005). Se observa entonces una clara influencia de la textura sobre los niveles críticos de P. De tal forma, la textura fina presentó el menor nivel, con un valor de 10 ppm, la media-fina presentó un valor intermedio de 13,8 ppm y la media-gruesa presentó el mayor nivel con un valor de 15,5 ppm (Figura 11). Estos resultados para textura fina fueron reportados por Barbagelata et al. (2002) en Argentina para suelos vertisólicos franco arcillo limosos, quien encontraron altas probabilidades de respuesta al agregado de P cuando el suelo estaba por debajo de 9,5 ppm.

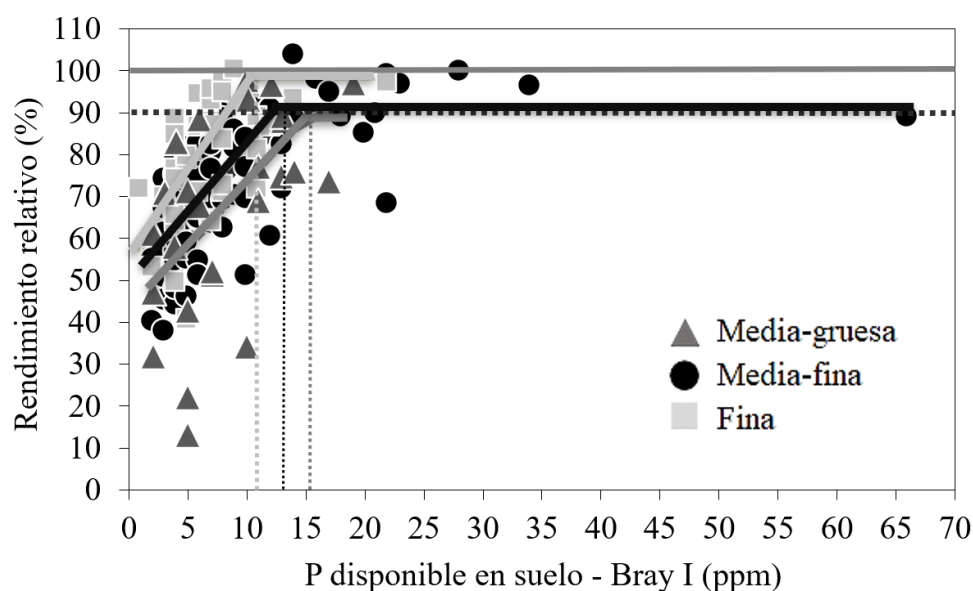


Figura 11. Rendimiento relativo en función del nivel de P en suelo, de todos los cultivos para las clases texturales principales

Cuadro 4. Coeficientes del modelo lineal plateau para la relación entre el rendimiento relativo y el fósforo en el suelo según clase textural

	Fina	Media-fina	Media-gruesa
R ²	0,29	0,50	0,30
Nivel crítico	10,2	13,8	15,5
A	52,82	51,66	42,32
B	4,59	2,74	3,13
Plateau (%)	99	91	91
p-valor	<0,001	<0,001	<0,001

Estos resultados coinciden con lo reportado en Paraguay por Cubilla (2005), quien menciona valores de 15 ppm y 12 ppm para clases texturales con contenido de arcilla de 210 a 400 g kg⁻¹ y 410 a 600 g kg⁻¹ respectivamente, en trigo, maíz y soja. Estas diferencias estarían fundamentadas en que los suelos con mayor contenido de arcilla presentan una mayor reserva de P, que no se expresa en el nivel de P disponible en suelo. En Passo Fundo, SBRS. CQFS (2004), publicó niveles críticos de 3 ppm por debajo de los anteriormente mencionados, para las mismas clases texturales utilizadas. De esta forma, se puede confirmar el resultado de que, a mayor contenido de arcilla, es menor el nivel crítico para alcanzar el cese de respuesta al agregado del P. Por su parte, Mielniczuk et al. (1969), encontraron diferencias aún mayores en los niveles críticos, estableciendo para clases franco-arcillosas y arenosas, valores de 8 ppm y 20 ppm respectivamente.

Siquiera et al. (1987) adoptaron un valor de 14 ppm para contenidos de arcilla de 260 a 400 g kg⁻¹.

Esta influencia de la textura también fue estudiada por Schlindwein (2003), quien luego de realizar calibraciones utilizando el método Mehlich-1, estableció niveles críticos respectivos de 10.5, 19.9 y 30.8 ppm para clases de 550 g kg⁻¹, 410 a 550 g kg⁻¹ y 110 a 400 g kg⁻¹ de arcilla.

4.3 DETERMINACIÓN DE LA DEFICIENCIA FOSFORADA A TRAVÉS DE LA EVOLUCIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA EN FUNCIÓN DEL FÓSFORO DISPONIBLE EN SUELO

4.3.1 Caracterización temporal de la evolución de dosis óptima

A nivel general, se encontró variación en la dosis óptima tanto entre los años de experimentación, como dentro de un mismo período de tiempo (Figura 12). A pesar de estas grandes diferencias, se pudo observar una tendencia negativa a través del tiempo.

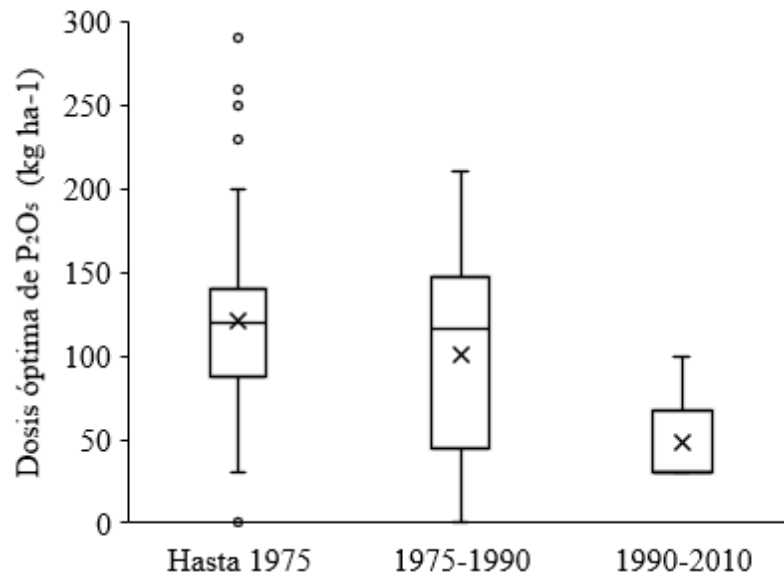


Figura 12. Evolución temporal de las dosis óptimas utilizadas para tres períodos de tiempo: hasta 1975, 1975-1990 y 1990-2010

Cuadro5. Valor promedio del fósforo disponible inicial en el suelo, agrupado en tres períodos de tiempo y su relación con las dosis óptimas

Período	n	P25	P75	P90	Media	P medio ^{&}
		----- kg P ₂ O ₅ ha-1 -----				--- ppm ---
Hasta 1975	48	90	140	200	121	7
1975-1990	4	50	140	164	100	7
1990-2010	31	30	60	90	48	11

n- número de sitios; P25, P75 y P90- Percentil a 25%, 75% y 90% respectivamente.

&- P en suelo.

En el primer y segundo período, particularmente en el extremo superior del primero, las dosis óptimas muy elevadas son el resultado de ambientes con P muy bajo o bajo (con valores mínimos de 2 ppm y medios de 7 ppm), donde la historia de fertilización fosforada anterior era escasa o nula. La fertilización con este nutriente comienza a tomar relevancia a partir de 1970. Además, la estimación de las dosis en estos sitios fue por ajuste de una ecuación matemática de tipo cuadrática (que puede llevar a sobre estimar la dosis óptima) y se desconoce la clasificación textural exacta de cada sitio.

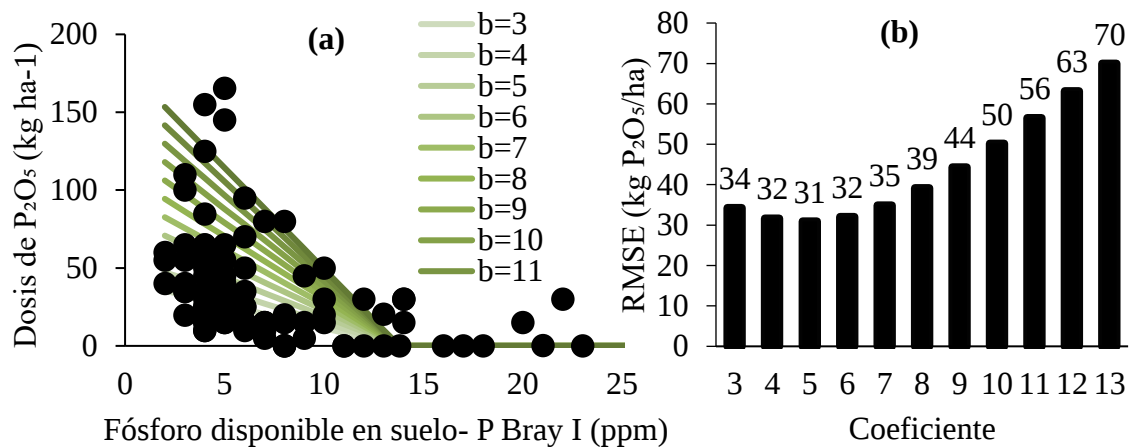
La caída abrupta en la dosis media de P₂O₅ hacia la última década del siglo XX, se explicaría en que los investigadores concentraron los experimentos en ambientes donde el P en el suelo es más elevado (Cuadro 5). Esto no permite afirmar que hubo un aumento en el nivel de P de los suelos con el tiempo, sino que la instalación de ensayos se realizó en sitios con mayor disponibilidad de P. Además, el número de sitios considerado en cada período (n) presenta una gran variación, lo que dificulta justificar de manera precisa esta disminución.

4.3.2 Relación entre la dosis óptima y la concentración de fósforo disponible en el suelo

Con el fin de analizar y profundizar el comportamiento de las dosis óptimas a medida que el P en el suelo cambia, y dado que el conjunto de datos presenta una gran dispersión, se plantearon isolíneas empíricas del tipo $a + bx$ de evolución de la dosis óptima P expresadas en kg de P₂O₅ por unidad de P por cada 1 ppm por debajo del nivel crítico.

Como se puede observar en la Figura 13, la ecuación que estima la dosis toma valor cero cuando el nivel de P en el suelo iguala al nivel crítico y por debajo de este se generan modelos lineales donde el b, se predefinió por valores desde 3 hasta 13.

Para identificar la isolínea con mejor ajuste al conjunto de datos, se graficó la relación entre los valores predichos por el modelo y las dosis óptimas reales utilizadas en cada sitio experimental (datos no mostrados). Para cada relación se estimaron los coeficientes a y b de la regresión y el R^2 . Mediante la técnica de selección por cuadrados medios del error - Root Mean Square Error (RMSE), calculado a partir de estos valores (Cuadro 6), se puede observar que el modelo con mejor ajuste es aquel que presenta un b de 5, ya que el error expresado kg de P_2O_5 por ha es menor y el valor de b es el más cercano a 1.



Las líneas representan los modelos lineales empíricos. b- coeficiente de la evolución de la dosis optima de fósforo agregado en función de la disminución de fósforo disponible en suelo por debajo del nivel crítico (14 ppm).

Figura 13. Relación entre el valor de dosis óptima y el nivel de fósforo disponible en el suelo para sitios de textura media-fina (a) y el RMSE de cada isolínea (b)

Cuadro 6. Valores de a y b de la ecuación $a + bx$ utilizada para isolíneas empíricas y RMSE para cada una de las isolíneas

Coefficiente b isolíneas	A	B	RMSE
3	4,985	1,444	34
4	4,985	1,083	32
5	4,985	0,866	31
6	4,985	0,722	32
7	4,985	0,618	35
8	4,985	0,541	39
9	4,985	0,481	44
10	4,985	0,433	50
11	4,985	0,393	56
12	4,985	0,361	63
13	4,985	0,333	70
N	93		

Términos de la regresión: a- intercepto, b- pendiente de la línea, R²- coeficiente de determinación; n- número de sitios.

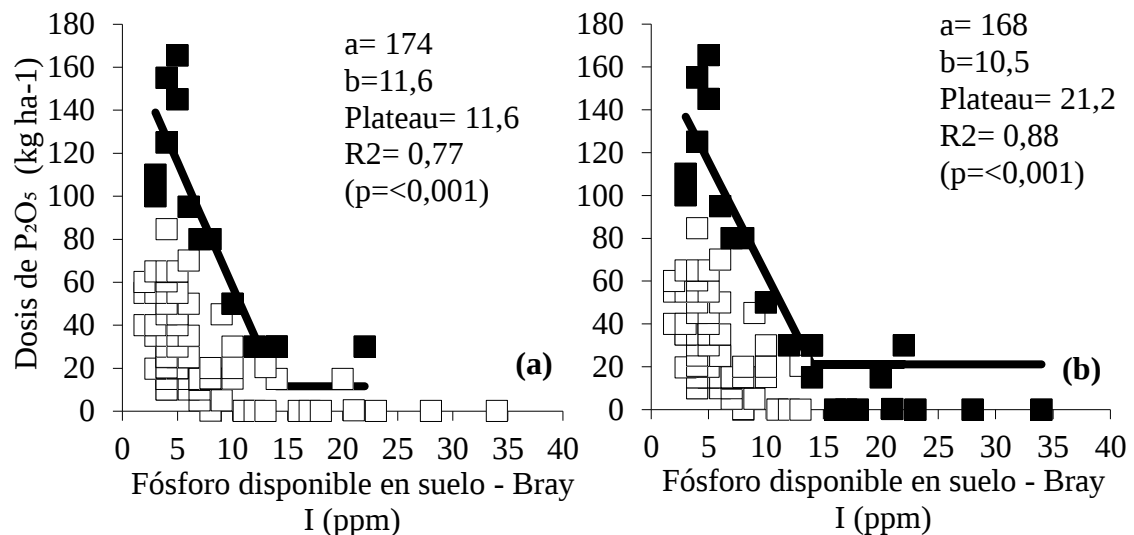
A medida que el valor de la isolínea aumenta, el coeficiente b se aleja de 1 y el error medio es mayor. El mismo comportamiento se observa cuando el b sobrepasa el 1. El R² obtenido bajo fue de 20%, indicando que el b representa una baja proporción de la variabilidad total de la dosis de P. La falta de ajuste se debe principalmente a la elevada densidad de sitios con dosis bajas cuando son muy bajos o bajos los valores de P en el suelo, lo que no es esperable.

En primer lugar, para esos sitios se desconoce la fecha de muestreo, lo que genera incertidumbre en la cantidad real de P disponible para el cultivo desde la siembra, condicionando la respuesta a dosis bajas en sitios donde el P disponible posiblemente fuere mayor que el valor estimado por el análisis de suelo. Los cambios en la disponibilidad de P en el período de barbecho determinan efectos temporarios de corto plazo, que pueden generar diferencias de hasta un 83% en el P disponible en suelo entre el inicio del barbecho y el día de la siembra. Este resultado es reportado por Hoffman et al. (2001) quienes midieron la evolución del P en los primeros 20 cm del suelo en un período de 120 días, observando que el cambio más importante se dio al final del período, pocos días antes de la siembra. Además, no se presentan datos del contenido de materia orgánica que serían útiles para entender la liberación de P como resultado de su oxidación de la MOS, ni de pH del suelo, necesarios para explicar la falta de respuesta y eficiencia de uso. Los datos de textura que presentaron estos sitios fueron generales y variaron desde clase media a fina, por lo que no hay seguridad en esta información para cada sitio específicamente. Finalmente, aunque se describe que la fuente de fertilizante utilizada fue superfosfato, el azufre puede estar jugando un papel relevante en la medida que el testigo sin P no tiene S. Estas características son señaladas por Ciampitti (2009) como las principales en afectar la respuesta vegetal al P.

La falta de información y el bajo ajuste de esta metodología para poder analizar cómo evoluciona la dosis de P en la medida que disminuye el P disponible en suelo, llevó a plantear como otra alternativa, el estudio del comportamiento de la dosis máxima a través del ajuste de una función frontera que representa un modelo de regresión lineal de dos tramos con plateau, obligado a pasar por el nivel crítico de esta clase textural, definido previamente en los resultados de 14 ppm. En la Figura 14 se puede observar que la discriminación de sitios con dosis superiores permitió mejorar el ajuste entre la dosis óptima y el nivel de P disponible en el suelo.

A partir de los datos presentes en la Figura 14, se desprende que, en la zona de máxima dosis, la cantidad de P_2O_5 necesaria para cubrir las deficiencias nutricionales, crece a un ritmo de 11,6 kg por cada ppm por debajo del nivel crítico, con un ajuste de 77%. Al considerar los sitios por encima del nivel crítico cuya dosis teórica es cero, el modelo lineal toma una pendiente equivalente a 10,5 kg de P_2O_5 donde el ajuste aumenta a valores cercanos a 90%.

Si bien se puede tomar este valor como referencia para resolver las máximas deficiencias de P en este tipo de ambientes, no se tiene seguridad de su aplicación para otros casos, falta de datos o una distribución desuniforme de los mismos no permitieron generar información en función de distintos cultivos, texturas u otra característica.



Cuadrados vacíos corresponden a los sitios generales. Cuadrados negros corresponden a los valores de dosis máxima que representan la frontera. Línea negra corresponde al modelo de dosis linear plateau.

Figura 14. Relación entre el valor de la dosis óptima y el nivel de fósforo disponible en el suelo, para los sitios dentro de la función frontera hasta el nivel crítico (a) y considerando todos los valores por encima del nivel crítico como parte del grupo que representa la dosis máxima (b)

En base a la información de este trabajo, para la clase textural dominante (media fina), y considerando que la evolución de la cantidad necesaria de P en la medida que se incrementa la deficiencia fosforada (en base al nivel de P en suelo) en la línea de frontera, representa la máxima cantidad de P, que asegura que un cultivo crezca sin deficiencias fosforadas, se puede considerar el b de esta ecuación de frontera, como un equivalente fertilizante (EF).

Este EF, no representa la cantidad de P necesaria para que el P en suelo se incremente a razón de una 1 ppm, como fue propuesto por en Uruguay (Oudri et al., 1976) sino que representa la cantidad de P_2O_5 necesaria para corregir las deficiencias de P, cuando el P en suelo está por debajo del nivel crítico identificado. Este valor oscilaría entre 10.5 y 11.6 kg de P_2O_5 por cada 1 ppm por debajo del nivel crítico general de 14 ppm de P-Bray 1 en suelo.

5. CONCLUSIONES

La historia sobre la fertilización fosforada en Uruguay, en base a los trabajos encontrados, se inició en 1965 y se extendió hasta 2014, con aproximadamente 80% de los experimentos instalados entre 1970 y 1990, concentrándose mayormente en cultivos de trigo y soja, y en menor medida en maíz, sorgo, girasol y cebada. La mayoría de los experimentos se ubicaron en el Litoral Oeste del país, sobre suelos de texturas medias-finas y un nivel inicial promedio de P disponible en suelo en torno a 9 ppm, que varió desde 7 ppm en los experimentos realizados al comienzo del período hasta 11 ppm hacia la última década del siglo XX.

El nivel inicial de P disponible resultó ser el principal condicionante de la respuesta al agregado de este nutriente, modificándose significativamente a partir de un valor de 6 ppm, donde se obtienen respuestas medias de 37%. Cuando el P disponible en el suelo es mayor o igual a 6 ppm, la respuesta media disminuye a 18%. A su vez, la textura del suelo mostró ser el segundo factor en determinar cambios significativos a un mismo nivel de P en suelo.

Se identificó un nivel crítico general de 14,5 ppm sin diferencias entre cultivos de invierno y de verano. Este valor para un rendimiento relativo de 90%, donde se logra el plateau y la respuesta al P no se altera.

El factor textura del suelo, modificó los niveles críticos de P-Bray-1. Según la clase textural, independientemente del cultivo, la tendencia de los niveles críticos siguió el orden: fina < media-fina < media-gruesa, con valores de 10,2, 13,8 y 15,5 ppm respectivamente.

La base de datos permitió seguir profundizando solamente con texturas medias finas y para las mismas no permitió calcular el EF general, sino que posible para una zona de mayor exigencia en P, mediante una línea de borde o frontera, calculada a partir del percentil 90% para la dosis óptima de P, según el nivel de P en suelo. El coeficiente b de dicha función frontera representa la tasa de incremento de la cantidad de P necesario por cada parte por debajo del nivel crítico identificado, y no tiene como objetivo incrementar el nivel de P en suelo a razón de 1 ppm, sino que plantea cubrir los requerimientos de P para que el cultivo crezca sin deficiencias fosforadas, a medida que el valor de P en suelo disminuye. Se propone utilizar ese coeficiente b como un valor de equivalente fertilizante, que oscila entre 10,5 y 11,6 kg de P_2O_5 por cada parte 1 ppm por debajo del nivel crítico general de 14 ppm.

Los resultados de este trabajo, además de mejorar la comprensión de los factores que afectan la respuesta al P y permitir una aproximación a los niveles críticos de P, y un EF pensado para resolver vía fertilización las cantidades necesarias de P, hace posible el planteo de nuevas hipótesis para continuar con una línea de investigación que posibilite

contar con información más precisa en cuanto a los NCs y EF para grupos de textura diferenciales. Considerando el bajo nivel de P en los suelos del Uruguay, y el volumen de divisas que le cuesta al país importar el P, es estratégico lograr un ajuste de niveles críticos y equivalentes fertilizantes más preciso.

6. RESUMEN

En los sistemas de producción de cultivos para grano, el fósforo (P) es uno de los nutrientes más limitantes. Realizar un diagnóstico de la fertilidad fosforada en base al P disponible en suelo en la capa superficial, define la probabilidad de respuesta al agregado de este nutriente y debería permitir estimar la cantidad de P necesaria. El objetivo principal de este trabajo fue integrar la información nacional existente sobre fertilización fosforada, para identificar los factores que afectan los patrones de respuesta al P, aproximarse a niveles críticos de P en suelo y proponer un método alternativo de estimación de equivalentes fertilizantes (EF), a través de la relación entre la dosis óptima y el nivel de P disponible en suelo. Se identificaron 257 experimentos, lo que permitió el armado de una base de metadatos. La información relevada fue variable, por lo que se clasificó en tres categorías (A, B y C) en función de la cantidad y calidad de esta. Temporalmente los ensayos identificados se iniciaron en 1965 hasta 2014, concentrándose mayormente en trigo y soja, y en menor medida en maíz, sorgo, girasol y cebada. La mayoría de los experimentos se ubicaron en el Litoral Oeste de Uruguay, sobre suelos de texturas medias-finas y un nivel inicial promedio de P disponible en suelo en torno a 9 ppm (aunque variable por períodos, con valores de 7 ppm al inicio y 11 ppm en los años más recientes). Mediante el método de partición recursiva de clasificación y regresión, se determinó que las principales variables determinantes de la respuesta al agregado de P fueron el nivel inicial de P en el suelo y la clase textural. El nivel crítico general se determinó mediante un modelo de tipo lineal plateau y el valor se situó en 14.5 ppm. De igual forma, se determinaron niveles críticos según la clase textural del suelo, lo que resultó en valores de 10.2 ppm, 13.8 ppm y 15.5 ppm para las texturas fina, media-fina y media-gruesa respectivamente. Para analizar la relación entre la dosis óptima a medida que el P disponible en el suelo se modifica, se seleccionaron los sitios de textura media-fina por presentar mayor número de datos (73% del total) ajustando líneas empíricas de tipo $a + bx$ sobre la dosis óptima de P_2O_5 en función del P en el suelo y para cada una de ellas los coeficientes de la regresión con su R^2 y RMSE correspondientes. Dado que la correlación fue baja (20%), se ajustó una función de borde (frontera) entre el P en suelo y la dosis óptima de P_2O_5 . El coeficiente b de esta ecuación, además de presentar un R^2 elevado (77% y 88%), se situó en valores de 10.5 y 11.6 por cada parte por debajo del nivel crítico general definido. Se propone utilizar esos coeficientes b como un valor de equivalente fertilizante, que permitiría cubrir las deficiencias fosforadas a medida que el valor de P en el suelo se hace más deficiente.

Palabras clave: Sistemas de producción; Fósforo; Niveles críticos; Respuesta; Textura; Dosis óptima; Equivalente fertilizante.

7. SUMMARY

In grain crop production systems, phosphorus (P) is one of the most limiting nutrients. Carrying out a diagnosis of phosphorus fertility based on the P available in the soil in the superficial layer, defines the probability of response to the addition of this nutrient and should allow estimating the amount of P needed. The main objective of this work was to integrate the existing national information on phosphorus fertilization, identify response patterns to P, approach critical levels of P in soil and propose an alternative method for the estimation of fertilizer equivalents (EF), considering the relationship between the optimal dose and the level of soil available P level. A review of 257 experiments-published were identified, followed by the assembly and analysis of metadata databases. The information collected was variable, so it was classified into three categories (A, B and C) based on information quantity and quality. Temporarily, the trials identified began in 1965 until 2014, most of them evaluated on wheat and soybeans, and to a lesser extent on corn, sorghum, sunflower, and barley. Most of the experiments were located on the western coast of Uruguay, especially in medium-fine textured soils and an initial average level of available P in the soil around 9 ppm (although it was variable by period, with values of 7 ppm at the beginning and 11 ppm in the most recent years). By the recursive partitioning of classification and regression method, it was adjudicated that the main determining variables of P fertilization responses were the soil initial P level and the soil texture. The general critical level of 14.5 ppm was determined using a linear-plateau model. Similarly, critical levels were determined according to the soil textural classes, which resulted in values of 10.2 ppm, 13.8 ppm and 15.5 ppm for fine, medium-fine and medium-coarse textures, respectively. To analyze the relationship between the optimal dose as the available P in the soil changes, the medium-fine textured sites were selected because they presented the greatest number of data (73% of the total) adjusting empirical lines of type $a + bx$ on the optimal dose of P_2O_5 as a function of P in the soil and for each of them the regression coefficients with their corresponding R^2 and RMSE. Since the correlation was low (20%), an alternative function (frontier) was fitted between soil P and the optimal P_2O_5 dose. The b coefficient of this equation, in addition to presenting a high R^2 (77% and 88%), was situated at values of 10.5 and 11.6 for each unit below the general critical level defined. It is proposed to use these coefficients b as a fertilizer equivalent value, which would allow to cover phosphorus deficiencies as the value of P in the soil becomes less available.

Key words: Grain production systems; Phosphorus; Critical levels; Fertilization responses; Texture; Optimal doses; Fertilizer equivalent coefficient.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Alburquerque, H. 1969. Introducción. In: Jornada de Cultivos (1ª., 1969, La Estanzuela, Colonia). Memorias. Miscelánea CIAAB. no. 8:1.
2. Armstrong, D. L. 1999. Functions of Phosphorus in Plants. Better crops with plant food. (en línea). Phosphorus for Agriculture. 83(1):6-7. Consultado abr. 2020. Disponible en <http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf.pdf>
3. Ascheri, L. M. 2007. Fertilización fosfatada de trigo en suelos haplustoles del Sudeste de Córdoba. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. no. 34:17-19.
4. Aulakh, M. S.; Pasricha, N. S.; Bahl, G. S. 2003. Phosphorus fertilizer response in an Irrigated soybean–wheat production system on a subtropical, semiarid soil. Field Crops Research. 80(2):99-109.
5. Baethgen, W.; Pérez, J. 1981. Efecto residual de la fertilización fosfatada en una rotación agrícola ganadera. (en línea). Miscelánea CIAAB. no. 37:p. irr. Consultado 13 may. 2020. Disponible en <http://www.inia.org.uy/sitios/tesis/fertilizacion/UY.CIAAB.MISC.1981.no.37.Baethgen.pdf>
6. Barbagelata, P.; Melchiori, R.; Paparotti, O. 2002. Phosphorus fertilization of soybeans in clay soils of Entre Ríos province. Better Crops International. 16(1):3-5.
7. Belcher, C. R.; Ragland, J. L. 1972. Phosphorus Absorption by Sod-Planted Corn (*Zea mays* L.) from Surface-Applied Phosphorus. Agronomy Journal. 64(6):754-756.
8. Bordoli, J. M.; Mallarino, A. P. 1998. Deep and shallow banding of phosphorus and Potassium as alternatives to broadcast fertilization for no till corn. Agronomy Journal. 90(1):27-33.
9. _____. 2001. Fertilización de trigo en siembra directa. In: Seminario Técnico (5º., 2001, Paysandú, Uruguay). Propuesta para el manejo del nitrógeno en cultivos de invierno. Montevideo, Facultad de Agronomía. p. irr.
10. _____.; Quincke, A.; Marchesi, A. 2004. Fertilización fosfatada de trigo en siembra directa. In: Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (19º.), Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos (2º., 2004, Paraná, Entre Ríos). Trabajos presentados. Paraná, AACS. 1 disco compacto.

11. Boxler, M.; García, F.; Mintegiaga, J.; Pozzi, R.; Firpo, L.; Deza, S.; Marín, G.; Berardo, A. 2006. Efectos directos y residuales de la fertilización en trigo/soja en la región CREA Sur de Santa Fé. (en línea). s.n.t. 6 p. Consultado 22 abr. 2021. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/239609134_EFECTOS_DIRECTOS_Y_RESIDUALES_DE_LA_FERTILIZACION_EN_TRIGOSOJA_EN_LA_REGION_CREA_SUR_DE_SANTA_FE/link/0deec536e525da2ad2000000/download
12. Capurro, E.; Baetghen, W.; Trujillo, A.; Bozzano, A. 1982. Rendimientos y respuesta a NPK de cebada cervecera. Miscelánea CIAAB. no. 43. 21 p.
13. Castro, J.; de Zamuz, E.; Oudri, N. 1981. Guía para la fertilización de pasturas. (en línea). Miscelánea CIAAB. no. 37:p.irr. Consultado 12 may. 2020. Disponible en <http://www.inia.org.uy/sitios/tesis/fertilizacion/UY.CIAAB.MISC.1981.no.37.GuiaCastro.df>
14. Ciampitti, I. 2009. Dinámica del fósforo del suelo en rotaciones agrícolas en ensayos de nutrición a largo plazo. Tesis MSc. Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 116 p.
15. Colomb, B.; Debaeke, P.; Jouany, C.; Nolot, J. M. 2007. Phosphorus management in low input stockless cropping systems: crop and soil responses to contrasting P regimes in a 36 year experiment in southern France. European Journal of Agronomy. 26(2):154-165.
16. Cubilla Andrada, M. M. 2005. Calibração visando à fertilização com fósforo para as principais culturas de grãos sob sistema plantio direto no Paraguai. Mestre em Ciência do Solo. Santa Maria, Brasil. Universidade Federal de Santa Maria. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. 160 p.
17. Dodd, J. R.; 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.
18. Erro, J. M.; Möller, R.; Saavedra, M. 2012. Respuesta al agregado de fósforo en soja de segunda. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 78 p.

19. Espósito, G.; Castillo, C.; Balboa, G.; Balboa, R. 2008. Nivel crítico de fósforo y azufre en suelos del Sur de Córdoba para el cultivo de soja. *Informaciones Agronómicas*. no. 43:16 - 19.
20. Ferrando, M.; Mercado, G.; Hernández, J. 2002. Dinámica del hierro y disponibilidad del fósforo durante períodos cortos de anaerobiosis en los suelos. *Agrociencia* (Montevideo). 5(1):1-9.
21. Ferrari, M.; Melchiori, R.; Fontanetto, H. 2005. Fertilización fosfórica en soja: el aporte de la fracción orgánica lábil del suelo. *In: Simposio de Fertilidad* (2005, Acassuso, Argentina). Trabajos presentados. Buenos Aires, INPOFOS Cono Sur. pp. 33-40.
22. García, A. 2009. Más de 25 años de investigación en manejo de la fertilización en trigo. *In: Jornada Técnica sobre el Efecto de la Agricultura en la Calidad de los Suelos y Fertilización de Cultivos* (2010, La Estanzuela, Mercedes, Uruguay). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 19-24 (Actividades de Difusión no. 605).
23. Gordon, R.; Franco, J. E.; Villarreal, J. E.; Smith, T. 2016. Manejo de la fertilización fosforada en el cultivo de maíz, El Ejido, Panamá 2004-2013. *Agronomía Mesoamericana*. 27(1):95-108.
24. Guillamon, G. 1984. Eficiencia y efecto residual de distintas fuentes de fósforo en cultivos anuales. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 144 p.
25. Helget, R. L. 2016. Soybean Yield and Plant Response to Phosphorus Fertilization. (en línea). Thesis MSc. North Dakota, United States. South Dakota State University. 129 p. Consultado mar. 2021. Disponible en <https://openprairie.sdstate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2075&context=etd>
26. Hernández, J.; Otegui, O.; Zamalvide, J. 1995. Formas y contenidos de fósforo en algunos suelos del Uruguay. Facultad de Agronomía (Montevideo). *Boletín de Investigación* no. 43. 32 p.
27. _____. 1999. Fósforo. Montevideo, Facultad de Agronomía. 89 p.
28. Hoffman, E.; Borghi, E.; Ernst, O.; Perdomo, C.; Hernández, J. 2001. Respuesta al agregado de P en cebada cervecera sembrada sin laboreo y su relación con la evolución del P en el suelo durante el período de barbecho. *Cangüé*. no. 21:12-14.

29. Howard, D. D.; Essington, M. E.; Logan, J. 2002. Long-term broadcast and phosphorus fertilization of corn produced using two tillage systems. *Agronomy Journal*. 94(1):51-56.
30. Labella, S. J.; Améndola, L. A. 1977. Eficiencia relativa de algunas fuentes de fósforo para la fertilización directa de cultivos de verano. CIAAB. Boletín técnico no. 24. 16 p.
31. Mallarino, A. 2005. Criterios de fertilización fosfatada en sistemas de agricultura continua con maíz y soja en el cinturón del maíz. *Informaciones Agronómicas*. no. 28:9-15.
32. MAP. DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes, UY). 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Montevideo. Escala 1:1.100.000.
33. Melgar, R.; Frutos, E; Galetto, M. L.; Vivas, H. 1995. El análisis de los suelos como predictor de la respuesta de la soja a la fertilización fosfatada. *In*: Congreso Nacional de Soja (1º), Reunión Nacional de Oleaginosas (2º., 1995, Pergamino, Argentina). Compendio de trabajos presentados. Buenos Aires, Argentina, s.e. pp. 167-174.
34. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2015. Regiones agropecuarias del Uruguay. (en línea). Montevideo. 42 p. Consultado abr. 2021. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/dieaanterior/regiones/Regiones2015.pdf>
35. Mielniczuk, J.; Ludwick, A.; Bohnen, H. 1969. Recomendações de adubo e calcário para as principais culturas do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, UFRGS. Faculdade de Agronomia e Veterinária. 36 p. (Boletim Técnico no. 2).
36. Morón, A. 1992. El fósforo en el sistema suelo planta. (en línea). *Investigaciones Agronómicas*. no. 1:45-60. Consultado mar. 2020. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital.pdf>
37. _____. 1996. El fósforo en los sistemas productivos: dinámica y disponibilidad en el suelo (I). (en línea). *In*: Morón, A.; Martino, D.; Sawchik, J. eds. Manejo y fertilidad de suelos. Montevideo, INIA. pp. 37-

44 (Serie Técnica no. 76). Consultado mar. 2020. Disponible en <http://www.inia.uy/Publicaciones.pdf>

38. _____. 2003. Informe de resultados de la red de ensayos de fertilización de soja 2002- 03. (en línea). In: Jornada técnica de Cultivos de Verano (2005, La Estanzuela, Colonia). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 53- 60 (Actividades de Difusión no. 417). Consultado feb. 2020. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item.pdf>
39. Oudri, N.; Castro, J. L.; Doti, R.; Secondi de Carbonell, A. 1976. Guía para fertilización de cultivos. Montevideo, CIAAB. 46 p.
40. Pérez-Sanabria, J.; Castro, J. L.; Manzini, E. 1981. Calibración de métodos de análisis de suelos para determinar la fertilización fosfatada del trigo. Investigaciones Agronómicas. no. 2:74-79.
41. Ramírez, R.; Beg, M.; Colmenares, O.; Meléndez, E.; Marbal, P.; Blanco, F.; Guzmán, E.; Hernández, C.; Chirinos, A. 1988. Relación entre la respuesta del maíz a la aplicación del fósforo y el P asimilable del suelo. Agronomía Tropical. 38(1-3):5-20.
42. SBCS. CQFS (Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Comissão de Química e Fertilidade do Solo, BR). 2004. Manual de recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10^a. ed. Porto Alegre. 394 p.
43. Siqueira, O.; Scherer, E.; Tassinari, G.; Anghinoni, I.; Patella, J. F.; Miñan, P. A.; Ernani, P. R. 1987. Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Passo Fundo, EMBRAPA/CNPT. 100 p.
44. Schlindwein, J. A. 2003. Calibração de métodos de extração de potássio em solos cultivados sob sistema plantio direto. Tese Doutorado. Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 169 p.
45. Stevenson, F. J.; Cole, M. A. 1986. Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. New York, Wiley. 397 p.
46. Sucunza, F. A.; Gutierrez, F. H.; García, F. O.; Boxler, M.; Rubio, G. 2018. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: soil test trends, critical levels and balances. European Journal of Agronomy. 96(1):87-95.

47. Vivas, H. S.; Vera Candioti, N.; Albrecht, R.; Martins, L.; Hotian, J. L. s.f. Fertilización con fósforo y azufre en rotación de cultivos del centro de Santa fe, Argentina: beneficios productivos y económicos y evolución del P extractable. (en línea). Informaciones Agronómicas. no. 1:17-21. Consultado 15 abr. 2020. Disponible en <http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf.pdf>
48. Zamalvide, J. P. 1992. Dinámica de fósforo en los suelos con especial referencia a la disponibilidad en rotaciones de cultivos y pasturas. Investigaciones Agronómicas. no. 1:85-93.
49. _____. 1996. El fósforo en los sistemas productivos: dinámica y disponibilidad en el suelo (II). (en línea). In: Morón, A.; Martino, D.; Sawchik, J. eds. Manejo y fertilidad de suelos. Montevideo, INIA. pp. 45-49 (Serie Técnica no. 76). Consultado mar. 2020. Disponible en <http://www.inia.uy/Publicaciones.pdf>