

Trabajo científico – Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal

POTASIO: EXPLORANDO DEFICIENCIAS Y RESPUESTAS A LA FERTILIZACIÓN EN LAS REGIONES PAMPEANA Y MESOPOTÁMICA ARGENTINAS

Juan Manuel Orcellet¹, César Quintero² , Fernando Salvaggiotti³ , Hernán Sainz Rozas⁴ , Luis Ventimiglia⁵, Gustavo Ferraris⁶, Enrique Figueroa⁷, Miguel Boxler⁸, Esteban Kehoe⁹ , María Micaela Biassoni³ , Damianos Damianidis³, María Fernanda González Sanjuan¹⁰, Esteban Ciarlo^{10,11}, Fernando Oscar García^{12,*} 

¹ Nidera Semillas, Argentina

² Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos, Oro Verde, Entre Ríos, Argentina

³ Grupo Manejo de Cultivos, Suelos y Agua, EEA Oliveros INTA y CONICET, Santa Fe, Argentina.

⁴ IPADS INTA-CONICET Balcarce/Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

⁵ AER INTA 9 de Julio, 9 de Julio, Buenos Aires, Argentina.

⁶ EEA INTA Pergamino, Pergamino, Buenos Aires, Argentina.

⁷ EEA INTA Mercedes, Mercedes, Corrientes, Argentina.

⁸ Consultor, Arias, Córdoba, Argentina.

⁹ Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario, Zavalla, Santa Fe, Argentina.

¹⁰ Fertilizar AC, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

¹¹ Cátedra de Edafología de la Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

¹² Consultor y Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

RESUMEN

Relevamientos recientes han evidenciado suelos con bajos niveles de potasio extractable (Kext) en zonas de la región pampeana argentina y de gran parte de la Mesopotamia. Entre 2019 y 2021, se plantearon redes experimentales con los objetivos de i) evaluar los niveles de Kext y las respuestas a la fertilización potásica en la región pampeana central (RPC) y Mesopotamia (MPT) y ii) determinar umbrales de respuesta a la fertilización con K a partir del análisis de Kext. Se llevaron a cabo 31 ensayos y 16 franjas exploratorias en maíz (*Zea mays* L.), soja (*Glycine max* (L.) Merr.), trigo (*Triticum aestivum* L.) y arroz (*Oryza sativa* L.) en MPT (Entre Ríos y sur de Corrientes) y 29 ensayos en RPC (sur de Santa Fe, sudeste de Córdoba, centro, oeste y sudeste de Buenos Aires). Los niveles de Kext promediaron 225 mg kg⁻¹ y 495 mg kg⁻¹ en MPT y RPC, respectivamente. En MPT se observaron respuestas significativas a la fertilización potásica en 18 de los 48 sitios evaluados. Las respuestas fueron estadísticamente significativas en 50% de los sitios de maíz, 23% de los de soja, 43% de los de trigo y ninguno de los de arroz, con incrementos de rendimiento promedio de 35%, 28% y 28% en maíz, soja y trigo, respectivamente. En RPC se registraron respuestas significativas en 4 de 28 ensayos. La calibración del análisis de suelo de Kext indica un rango crítico de 157-213 mg K kg⁻¹ por debajo del cual la probabilidad de respuesta a la fertilización potásica es alta. Los análisis de planta, foliares o de grano, no permitieron diferenciar las situaciones sin y con deficiencia. Los resultados muestran que el K puede limitar el rendimiento de los cultivos y que el diagnóstico de fertilidad potásica basado en el análisis de suelo sería una metodología capaz de detectar condiciones de deficiencia o suficiencia de este nutriente.

Palabras clave: soja, trigo, maíz, arroz.

* Autor de contacto:
fgarcia1957@gmail.com

Recibido:
30-01-25

Recibido con revisiones:
21-02-25

Aceptado:
21-02-25

Este artículo está bajo
licencia internacional



La titularidad del derecho de
autor/a es de los/as Autores/as.

POTASSIUM: EXPLORING DEFICIENCIES AND RESPONSES TO FERTILIZATION IN THE PAMPAS AND MESOPOTAMIAN REGIONS OF ARGENTINA

ABSTRACT

Recent surveys have revealed soils with low levels of extractable potassium (Kext) in areas of the Argentine Pampas region and a large part of Mesopotamia. Between 2019 and 2021, experimental networks were set up with the objectives of i) evaluating Kext levels and responses to K fertilization in the central Pampas region (RPC) and Mesopotamia (MPT) and ii) determining response thresholds to K fertilization from Kext analysis. Thirty one trials and 16 exploratory strips were carried out with corn (*Zea mays* L.), soybeans (*Glycine max* (L.) Merr.), wheat (*Triticum aestivum* L.), and rice (*Oryza sativa* L.) in MPT (Entre Ríos and southern Corrientes) and 29 trials were conducted in RPC (southern Santa Fe, southeastern Córdoba, central, western and southeastern Buenos Aires). Kext levels averaged 225 mg kg⁻¹ and 495 mg kg⁻¹ in MPT and RPC, respectively. In MPT, significant responses to K fertilization were observed in 18 of the 48 sites evaluated. Responses were statistically significant in 50% of the corn sites, 23% of the soybean sites, 43% of the wheat sites, and there were not statistically significant response in the rice sites, with average yield increases of 35%, 28%, and 28% in corn, soybean, and wheat, respectively. In RPC, significant responses were recorded in 4 of 28 trials. The calibration of the Kext soil analysis indicates a critical range of 157-213 mg K kg⁻¹ below which the probability of response to K fertilization is high. Plant, foliar, or grain analyses did not allow to differentiate deficient from non-deficient situations. The results show that K can limit crop yields, and that K fertility diagnosis based on soil analysis may be a suitable methodology for detecting deficiency or sufficiency conditions of this nutrient.

Keywords: soybean, wheat, maize, rice.

INTRODUCCION

El potasio (K) es uno de los tres macronutrientes generalmente deficientes para el crecimiento de las plantas, junto con el nitrógeno y el fósforo, en sistemas de producción agrícola a nivel mundial. Los requerimientos de K de los cultivos son elevados y solo superados por los de nitrógeno. Muchas regiones del mundo presentan deficiencias de este nutriente y la producción de cultivos requiere de aplicaciones de fertilizantes y/o abonos potásicos (Dhillon et al., 2019; Brownlie et al., 2024). En Argentina, los suelos deficientes en K históricamente se hallan en regiones de las provincias de Corrientes y Misiones, y algunas zonas del noroeste (De la Horra y Mizuno, 1974; Moscatelli et al., 2001). Los bajos niveles de esos suelos están relacionados con los materiales originarios que presentan minerales con bajo contenido de K (Morras y Cruzate, 2001). En estas regiones se han observado respuestas significativas a aplicaciones de K en arroz (*Oryza sativa* L.) (+20-38%), algodón (*Gossypium hirsutum* L.) (+16%) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) (+8-16%) (Melgar et al., 1994, 1996; Méndez et al., 2001; Pérez Zamora, 2014). En su condición original, los suelos de la región pampeana argentina presentaban altos contenidos de K extractable (Kext), en general superiores a 1,2 cmol_c kg⁻¹ (468 mg kg⁻¹) (Marchi et al., 1995; Zubillaga y Conti, 1996; Moscatelli et al., 2001; Morras y Cruzate, 2001; Carrizo et al., 2011; Larrea et al., 2023), y ensayos exploratorios han mostrado bajas probabilidades de respuesta en cultivos extensivos como maíz (*Zea mays* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.) y soja (*Glycine max* (L.) Merr.) (Melgar et al., 2001; Diaz Zorita et al., 2004; García, 2008).

Sainz Rozas et al. (2019), en un relevamiento a escala regional, observaron una disminución en los niveles de Kext en los suelos bajo producción agrícola de la región pampeana, con caídas del orden del 12-30% en un período de 7 años. Además de observar caídas en los niveles de Kext en la región pampeana, se identificaron áreas en la región este de Entre Ríos con niveles por debajo de 200 mg kg⁻¹. Estas disminuciones en Kext pueden haberse acentuado debido a la mayor remoción de K por la expansión del área de cultivo de granos y el incremento de los rendimientos en dicha región (Conti et al., 2001; Carrizo et al., 2011; García y González Sanjuan, 2016; Correndo et al., 2021; Larrea et al., 2023). Este proceso también fue observado en áreas del Litoral Oeste de Uruguay (Barbazán et al., 2011) y en el cinturón maicero de Estados Unidos (The Fertilizer Institute, 2020).

La disponibilidad de K para los cultivos suele diagnosticarse midiendo la fracción soluble + intercambiable de K (Kext) del suelo. Este indicador ha mostrado relativa precisión y exactitud como herramienta de diagnóstico, siendo el más utilizado a nivel mundial para identificar sitios con mayor probabilidad de respuesta

a la fertilización con K (Bell et al., 2021).

Investigaciones realizadas en EE.UU. y Uruguay definieron umbrales críticos de Kext de 120 a 180 mg kg⁻¹, por debajo de los cuales la respuesta a K es altamente probable en maíz, soja, trigo y otros cultivos extensivos (Wortmann et al., 2009; Barbazán et al., 2011; Mallarino et al., 2023).

Teniendo en cuenta los cambios en los niveles de Kext en suelos de las regiones pampeana y mesopotámica, los objetivos del presente trabajo fueron i) evaluar los niveles de Kext y las respuestas a la fertilización potásica en zonas de la región pampeana central (RPC) y Mesopotamia (MPT) y ii) determinar umbrales de respuesta a la fertilización con K a partir del análisis de Kext y otras variables del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios experimentales

Durante las campañas agrícolas 2019/20, 2020/21 y 2021/22 se establecieron 60 ensayos y 16 franjas de fertilización potásica en cultivos de maíz, soja, trigo y arroz en diferentes localidades de la RPC (Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe) y MPT (Corrientes y Entre Ríos). En la RPC se implementaron 29 ensayos, y en MPT 31 ensayos y 16 franjas experimentales (Tabla 1).

Los suelos sobre los que se implantaron los ensayos y las franjas fueron clasificados como Argiudoles típicos, vérticos, rendólicos y ácuicos; Hapludoles típicos y fluvénticos; Pelludertes árgicos, argiudólicos y ácuicos; Ocracualfes vérticos; y Argiacuoles (Soil Survey Staff, 1999).

Tabla 1. Características de los sitios evaluados en los experimentos de campo.

Table 1. Characteristics of the evaluated sites in the field experiments.

Año	Localidad	Provincia	Zona ¹	Experi- mento	Cultivo	Precip ²	pH	MO	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Kext	Kext
						mm		g kg ⁻¹		cmol _c kg ⁻¹		mg kg ⁻¹	
2019	Mercedes	Corrientes	MPT	Ensayo	Arroz	471	5,5	33	20,6	12,0	4,3	0,28	107
2019	San Salvador	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Arroz	675	7,1	33	25,2	20,3	4,2	0,90	351
2019	EEA INTA Mercedes	Corrientes	MPT	Ensayo	Maíz	592	5,9	24	12,5	7,6	1,5	0,09	33
2019	El Rocío	Corrientes	MPT	Ensayo	Maíz	533	5,9	17	13,9	9,8	1,8	0,10	39
2019	Herrera	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Maíz	292	7,3	37	43,7	41,5	3,4	0,93	364
2019	La Concepción	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Maíz	292	6,9	25	31,3	26,0	2,5	0,44	173
2019	San Martin	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Maíz	292	5,7	20	11,6	8,0	1,6	0,17	113
2019	DC San Martin	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Soja	292	5,7	20	11,6	8,0	1,6	0,17	65
2019	EEA INTA Mercedes	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Soja	662	5,9	24	12,5	7,6	1,5	0,09	33
2019	FS San Martin	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Soja	292	5,7	20	11,6	8,0	1,6	0,17	65
2019	La Concepción	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Soja	292	7,3	24	38,6	41,3	2,7	0,59	231
2019	Laurencena	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Soja	382	7,0	31	29,7	23,1	4,2	1,27	495
2019	Nogoya	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Soja	382	8,1	29	23,5	18,5	4,2	0,88	343
2019	San José	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Soja	292	7,0	34	36,0	35,6	3,4	0,70	271
2019	Victoria	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Soja	331	7,5	44	32,7	30,1	4,5	1,43	558
2020	Mercedes	Corrientes	MPT	Ensayo	Trigo	537	5,6	25	12,4	8,3	1,8	0,30	117
2020	Gualeguay-chú	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Trigo	253	6,8	35	27,7	32,7	2,8	0,50	189
2020	Nogoya	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Trigo	174	6,3	36	29,4	17,8	2,1	1,50	593
2021	San Jaime	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Arroz	426	6,1	30	26,6	17,3	4,5	0,70	271
2021	El Rocío	Corrientes	MPT	Ensayo	Maíz	494	5,8	19	13,7	9,1	2,0	0,27	103
2021	San Martin	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Maíz	500	5,3	17	6,3	2,7	0,7	0,23	90
2021	Barú	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Soja	638	7,7					0,93	364
2021	Barú residual	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Soja	638	7,7					0,93	364
2021	Pajonales	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Soja	517	5,9	36	18,9	13,5	2,0	1,00	372
2021	Perdices	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Soja	761	5,6	26	10,6	6,5	1,1	0,44	172
2021	Perdices residual	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Soja	761	5,6	26	10,6	6,5	1,1	0,44	172
2021	Barú AP	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Trigo	367	7,7	28				0,93	364
2021	Barú BP	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Trigo	367	6,7	23				0,57	84
2021	Barú MP	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Trigo	367	7,4	22				0,22	222
2021	Gualeguay-chú	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Trigo	484	5,1	16	5,1	2,3	0,7	0,18	70
2021	Perdices	Entre Ríos	MPT	Ensayo	Trigo	367	5,6	26	10,6	6,5	1,1	0,44	172
2019	9 de Julio	Buenos Aires	RPC	Ensayo	Soja	638	5,7	25	10,1	5,7	1,1	1,00	402
2019	Balcarce	Buenos Aires	RPC	Ensayo	Soja	401	5,7	52	18,9	10,8	1,8	1,70	681
2019	Diego de Alvear	Santa Fe	RPC	Ensayo	Soja	773	5,8	26	10,2	6,3	1,3	1,30	488

2019	General Gelly	Santa Fe	RPC	Ensayo	Soja	410	6,1	22	13,7	8,2	1,7	0,80	330
2019	Oliveros	Santa Fe	RPC	Ensayo	Soja	484	6,0	24	10,5	7,9	1,7	0,90	359
2020	Balcarce	Buenos Aires	RPC	Ensayo	Maíz	285	5,6	50	19,4	10,8	1,8	1,70	662
2020	Ferré	Buenos Aires	RPC	Ensayo	Maíz	298	6,1	28	12,7	7,3	1,9	1,50	585
2020	Arias	Córdoba	RPC	Ensayo	Maíz	357	6,3	27	13,9	8,2	2,1	1,70	679
2020	Gualeguaychú	Entre Ríos	RPC	Ensayo	Maíz	312	6,7	37	37,6	32,2	3,9	0,70	265
2020	Oliveros	Santa Fe	RPC	Ensayo	Maíz	449	6,0	25	11,3	7,2	1,5	0,80	306
2020	9 de Julio*	Buenos Aires	RPC	Ensayo	Soja	172	6,0	26	10,3	6,4	1,4	1,10	437
2020	Balcarce	Buenos Aires	RPC	Ensayo	Soja	285	5,9	50	19,8	10,6	1,9	1,60	642
2020	Alejo Ledesma	Córdoba	RPC	Ensayo	Soja	397	6,5	20	11,7	6,7	2,5	1,50	597
2020	General Gelly	Santa Fe	RPC	Ensayo	Soja	450			13,7	8,3	1,6	0,86	335
2020	Oliveros	Santa Fe	RPC	Ensayo	Soja	544	5,8	22	11,3	5,9	1,2	0,90	339
2020	9 de Julio	Buenos Aires	RPC	Ensayo	Trigo	334	6,0	25	11,1	6,6	1,1	1,30	491
2020	Balcarce	Buenos Aires	RPC	Ensayo	Trigo	326	5,9	50	19,8	10,6	1,9	1,60	642
2020	Alejo Ledesma	Córdoba	RPC	Ensayo	Trigo	220	6,5	20	11,7	6,7	2,5	1,50	597
2020	General Gelly	Santa Fe	RPC	Ensayo	Trigo	302			13,7	8,3	1,6	0,86	335
2020	Oliveros	Santa Fe	RPC	Ensayo	Trigo	237	5,6	26	11,0	6,8	1,5	0,80	306
2021	Balcarce	Buenos Aires	RPC	Ensayo	Maíz	470	5,6	50	17,0	10,4	2,1	1,70	663
2021	Marcos Juárez	Córdoba	RPC	Ensayo	Maíz	537	5,9	20	10,6	6,4	1,7	1,60	632
2021	General Gelly	Santa Fe	RPC	Ensayo	Maíz	501	6,0	21		7,9	1,6	0,83	325
2021	Oliveros	Santa Fe	RPC	Ensayo	Maíz	450	6,1	26	10,8	7,6	1,4	1,00	378
2021	25 de Mayo	Buenos Aires	RPC	Ensayo	Trigo	272	5,6	20		3,4	0,6	0,64	250
2021	Balcarce	Buenos Aires	RPC	Ensayo	Trigo	333	5,5	58	20,9	11,2	2,1	1,64	638
2021	Pergamino	Buenos Aires	RPC	Ensayo	Trigo	334	6,2	32	13,9	9,3	1,5	1,35	525
2021	Alejo Ledesma	Córdoba	RPC	Ensayo	Trigo	273	6,1	22	11,5	7,9	1,9	1,32	515
2021	Oliveros	Santa Fe	RPC	Ensayo	Trigo	332	6,2	29	15,9	10,6	2,5	1,21	470
2021	El Chana	Entre Ríos	MPT	Franjas	Maíz	465	6,5	39				0,64	249
2021	Fadel HP	Entre Ríos	MPT	Franjas	Maíz	156	6,9	35	34,4	21,7	4,3	0,47	182
2021	Fadel LP	Entre Ríos	MPT	Franjas	Maíz	156	6,5	37	28,8	17,8	4,2	0,34	135
2021	La China	Entre Ríos	MPT	Franjas	Maíz	500	6,1	30				0,53	206
2021	La Marianita	Entre Ríos	MPT	Franjas	Maíz	381	5,9	31				0,61	239
2021	Las 4 Marias	Entre Ríos	MPT	Franjas	Maíz	465	5,9	31				0,61	239
2021	Los O'Dwyer LP	Entre Ríos	MPT	Franjas	Maíz	418	6,7	21	21,7	16,2	2,4	0,21	82
2021	Los O'Dwyer MP	Entre Ríos	MPT	Franjas	Maíz	418	6,3	26	24,8	15,4	3,1	0,24	94

2021	San Juan	Entre Ríos	MPT	Franjas	Maíz	500	6,3	38	0,65	256
2021	San Pedro Antelo	Entre Ríos	MPT	Franjas	Maíz	381	6,5	30	0,90	351
2021	MSU Dry Maíz	Entre Ríos	MPT	Franjas	Trigo	484		30	0,45	177
2021	MSU Dry Soja	Entre Ríos	MPT	Franjas	Trigo	484		35	0,75	294
2021	MSU Riego Maíz	Entre Ríos	MPT	Franjas	Trigo	367		30	0,45	174
2021	MSU Riego Soja	Entre Ríos	MPT	Franjas	Trigo	367		38	0,65	254
2021	Santa Cipriana Maíz	Entre Ríos	MPT	Franjas	Trigo	367		41	0,75	294
2021	Santa Cipriana Soja	Entre Ríos	MPT	Franjas	Trigo	367		47	0,84	329

¹ Zona MPT incluye sitios de Entre Ríos y Corrientes; zona RPC comprende sitios de Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe. ²Precip: Precipitaciones durante el ciclo del cultivo. * No se cosecho por efecto de sequía.

MO: materia orgánica, CIC: capacidad de intercambio catiónica, Ca²⁺: calcio, Mg²⁺: magnesio, Kext: potasio intercambiable.

Experimentos y diseño de tratamientos

Se realizaron dos tipos de experimentos: (i) ensayos en bloques completos al azar con tres o cuatro repeticiones y (ii) franjas exploratorias con dos o tres repeticiones. En ambas experiencias se evaluó el efecto de distintas dosis de K en trigo, maíz, arroz y soja. En los ensayos se aplicaron cuatro dosis de K: 0, 30, 60 y 90 o 120 kg ha⁻¹ de K, esta última dependiendo del tipo de cultivo. Las parcelas de los ensayos fueron de 5-15 m de ancho por 10-50 m de largo. Las franjas exploratorias consistieron en parcelas comerciales apareadas, de 15-30 m de ancho por 100-200 m de largo, en las cuales se incluyeron i) tratamiento testigo, sin aplicación de K y ii) tratamiento de fertilización con 60-90 kg ha⁻¹ de K. La fuente de K fue cloruro de K (50% K), aplicado al voleo en superficie a la siembra de los cultivos. En todos los tratamientos se aplicaron 40-150 kg ha⁻¹ de nitrógeno (excepto en soja), 10-30 kg ha⁻¹ de fósforo y/o 5-15 kg ha⁻¹ de azufre para evitar limitaciones de estos nutrientes en los cultivos cuando se diagnosticaron deficiencias de los mismos.

Determinaciones en suelo y cultivo

Para el análisis químico del suelo se extrajeron muestras de suelo a 0-20 cm a la siembra de los cultivos de cada repetición. Las muestras fueron secadas a 40°C para luego ser tamizadas por 2 mm. Se analizaron Ca, Mg, K y Na intercambiables por extracción con acetato de amonio 1N a pH 7 y se cuantificó el Ca y Mg por absorción atómica y el K y Na por fotometría de llama (Richter et al., 1982); capacidad de intercambio catiónico (CIC) por desplazamiento con Cl₂Ba y posterior determinación del amonio desplazado por destilación y titulación; pH por el método potenciométrico en una relación suelo:agua 1: 2,5 (Thomas, 1996); fósforo extractable (Bray y Kurtz, 1945); S-sulfatos por turbidimetría (Kowalenko y Grimmett, 2008), boro por extracción con agua caliente (Matula, 2009) y zinc por extracción con ácido dietilentriaminopenta-acético (DTPA) (Lindsay y Norvell, 1978). La materia orgánica se estimó a partir de la cuantificación del carbono orgánico oxidable por el método de Walkley y Black (Nelson y Sommers, 1996).

La disponibilidad de K del suelo para los cultivos se caracterizó mediante los niveles de Kext, la saturación de K del complejo de intercambio (relación Kext/CIC, Ksat) y la relación de cationes intercambiables (Ca+Mg)/K. La saturación de K y la relación de cationes intercambiables siempre se calcula en unidades de cmol_c kg⁻¹.

En sitios y tratamientos seleccionados se evaluó la concentración de K en los cultivos en las siguientes etapas:

Etapa vegetativa: V5-6 para maíz (5 sitios), Zadoks 3.0 para trigo (5 sitios), V6 para soja (5 sitios), macollamiento para arroz, última hoja o folíolos desarrollados (2 sitios).

Etapa reproductiva: R1 para maíz (11 sitios), Zadoks 6.0 para trigo (11 sitios), R1-2 para soja (17 sitios), floración para arroz, última hoja o folíolos (3 sitios). desarrollados.

A madurez de cosecha de los cultivos se determinó el rendimiento en grano en cada tratamiento, mediante la cosecha manual de al menos 2 m² de cada parcela (ensayos) o la cosecha mecánica de un área definida (franjas). Los rendimientos se expresaron en humedad comercial de cada cultivo (maíz 14.5%, trigo 14%, soja 13.5%, arroz 14%). Al momento de la cosecha, se obtuvieron submuestras de grano en sitios y tratamientos seleccionados para determinar la concentración de K: 14 sitios en maíz, 7 sitios en trigo, 14 sitios en soja y 3 sitios en arroz. Las muestras de hojas y granos se secaron, molieron y analizaron mediante fotometría de llama de emisión para precisar la concentración de K.

Análisis estadísticos

Los experimentos se analizaron estadísticamente separando los correspondientes a los sitios de MPT (Entre Ríos y Corrientes) de los de la RPC (Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe), considerando las características mineralógicas contrastantes en contenido de K total indicadas por Morras y Cruzate (2001) al este y oeste del Río Paraná, y los bajos niveles de Kext observados en áreas de Entre Ríos y Corrientes (De la Horra y Mizuno, 1974; Moscatelli et al., 2001) respecto de la RPC (Sainz Rozas et al., 2019).

El efecto de la dosis de K en el rendimiento en grano y en la concentración de K en los cultivos se analizó mediante el análisis de la varianza (ANOVA). Los datos se evaluaron para cada sitio experimental y cultivo por separado. Al detectar efectos de tratamiento significativos ($p < 0,10$), las medias se compararon mediante la prueba de diferencia mínima significativa (LSD) al analizar los ensayos o la prueba t en el caso de las franjas.

La relación entre el Kext y Ksat con el rendimiento relativo (RR, (Rendimiento testigo sin K/Rendimiento máximo con aplicación de K) *100), se evaluó mediante el método del arco seno-logaritmo modificado, propuesto por Correndo et al. (2017) en el paquete soiltestcorr (Correndo et al., 2023). Este método transforma los datos de RR (arcoseno de la raíz cuadrada del RR) y de análisis de suelo (logaritmo natural), y luego invierte los ejes para que el valor del análisis de suelo sea la variable dependiente. Los valores de RR superiores a 100 se consideraron igual a este valor.

Para cada zona, RPC y MPT, se determinaron los coeficientes de correlación de Pearson (r) entre la respuesta a la aplicación de K y el contenido de K en los estados vegetativo y reproductivo y grano de los cultivos, y entre el RR y variables de suelo.

El análisis estadístico de los datos se realizó con el programa Excel (© 2024 Microsoft, Versión 16.92).

RESULTADOS

Las precipitaciones fueron variables entre sitios y años, con rangos de 156-592, 172-773 y 174-537 mm durante los ciclos de maíz, soja y trigo, respectivamente. En algunos sitios se registraron excesos hídricos, pero en general las tres campañas se caracterizaron por tener déficits hídricos durante el ciclo de los cultivos que afectaron los rendimientos. El cultivo de arroz se realizó bajo riego en todos los casos, con una oferta uniforme de humedad.

Características químicas de los suelos

Los valores promedio para las diferentes variables de suelo se presentan separadamente para la zona MPT y la zona RPC (Tabla 2). Los niveles de pH promediaron 6,4 y 5,9, con rangos de 5,1-8,1 y 5,5-6,5, para las zonas MPT y RPC; respectivamente. El contenido de materia orgánica (MO) varió entre 1,6 y 4,7% (media 3,0%) en la zona MPT, y de 2,0 a 5,8% (media 3,1%) en la zona RPC. La CIC promedió 21,7 cmol_c kg⁻¹ (5,1-43,7 cmol_c kg⁻¹) y 13,6 cmol_c kg⁻¹ (10,1-20,9 cmol_c kg⁻¹) en las zonas MPT y RPC; respectivamente. La saturación de cationes fluctuó entre 58% y 98% en la zona MPT y entre 72% y 97% en la zona RPC.

En la zona MPT, los niveles de Kext promediaron 225 mg kg⁻¹, con un rango de 33 a 593 mg kg⁻¹, ubicándose el 50% de los datos centrales entre 112 (cuartil 1) y 303 (cuartil 3) mg kg⁻¹, con un rango intercuartil (RIC) de 191 mg kg⁻¹. La saturación de K del complejo de intercambio promedió 2,5%, con el 50% de los datos centrales entre 1,4 y 3,7%, con un RIC de 2,64%. Estos datos están sesgados ya que la mediana está más

próxima al percentil 25 de 1,4% que al percentil 75 de 3,7%. Por otra parte, la relación (Ca+Mg)/K promedió 49 con el 50% de los datos centrales entre 65 y 22.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de distintas variables químicas del suelo (0-20 cm) previo a la siembra de los cultivos, en los diferentes sitios experimentales de MPT y RPC.

Table 2. Descriptive statistics of different soil chemical variables (0-20 cm) prior to sowing crops, at different experimental sites of MPT and RPC.

	pH	MO g kg ⁻¹	P Bray mg kg ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Kext cmol _c kg ⁻¹	Na ⁺	CIC	S-SO ₄	Zn mg kg ⁻¹	B	Kext
MPT												
Mediana	6,3	30	8,4	15,4	2,35	0,46	0,1	21,7	5,8	0,5	0,4	214
Promedio	6,4	30	10,1	16,9	2,61	0,56	0,4	21,7	6,1	0,7	0,4	225
DE	0,8	07	6,8	11,2	1,26	0,36	0,6	10,7	3,8	0,6	0,1	133
Min	5,1	16	2,5	2,3	0,67	0,09	0,0	5,1	2,0	0,2	0,3	33
Max	8,1	47	33,0	41,5	4,50	1,50	3,3	43,7	22,3	3,0	0,6	593
q1	5,8	24	5,4	8,0	1,65	0,25	0,1	12,0	3,8	0,4	0,4	112
q3	6,9	35	13,5	22,4	4,03	0,82	0,4	29,6	6,4	0,6	0,5	303
RPC												
Mediana	6,0	26	12	7,8	1,70	1,31	0,1	12,7	4,7	0,7	0,8	503
Promedio	5,9	31	14	8	1,70	1,26	0,1	13,6	4,7	0,9	0,9	495
DE	0,3	12	7	1,9	0,44	0,35	0,1	3,4	1,7	0,5	0,5	139
Min	5,5	20	5	3,4	0,61	0,64	0	10,1	2	0,4	0,4	250
Max	6,5	58	33	11,2	2,50	1,70	0,2	20,9	8,4	2,1	2,4	681
q1	5,7	23	11	6,7	1,48	0,90	0	11,1	3,7	0,6	0,5	354
q3	6,1	31	17	9,6	1,90	1,60	0,1	14,9	6,0	1,1	1,1	634

DE: desvío estándar, Min: valor mínimo, Max: valor máximo, q1: percentil 25, q3: percentil 75. MO: materia orgánica, P Bray: fosforo Bray, Ca²⁺: calcio, Mg²⁺: magnesio, K⁺: potasio, Na⁺: sodio, CIC: capacidad de intercambio catiónica, S-SO₄: azufre-sulfato, Zn: zinc, B: boro.

En comparación con MPT, en la zona RPC la disponibilidad de K fue mayor ya que los niveles de Kext fueron más elevados (promedio 495 mg kg⁻¹ y RIC de 280 mg kg⁻¹, entre 354 y 634 mg kg⁻¹) al igual que la saturación de K (promedio 9,7% y RIC de 3,9%, diferencia entre 7,9 y 11,8%), mientras que la relación (Ca+Mg)/K fue menor (promedio 8 y RIC de 9,3). Los datos de Kext son simétricos ya que la mediana se ubica en el centro de la caja, mientras que los correspondientes a los de saturación de K y relación (Ca+Mg)/K están sesgados dado que la mediana se centra más cerca de la parte inferior de la caja.

Respuestas a la fertilización con potasio

Rendimientos en grano en las zonas MPT y RPC: En la zona MPT se observaron respuestas significativas a la fertilización potásica en 18 de los 48 sitios evaluados (37% de sitios con respuesta). Los rendimientos promedio de los cuatro cultivos se ubicaron en los niveles medios de los buenos manejos de la región y con marcada variabilidad entre sitios y campañas. Los valores promedio fueron 7836 y 8408 kg ha⁻¹ para arroz, 5191 y 6355 kg ha⁻¹ para maíz, 2086 y 2275 kg ha⁻¹ para soja y 4611 y 4896 kg ha⁻¹ para trigo, en los testigos y fertilizados, respectivamente (Tabla 3).

Las respuestas de los cultivos a la aplicación de K fueron muy variables, registrándose respuestas estadísticamente significativas (p < 0,10) en 9 de los 18 ensayos y franjas de maíz (frecuencia de 50%), en 3 de los

13 ensayos de soja (frecuencia de 23%), en 6 de los 14 ensayos y franjas de trigo (frecuencia de 43%) y en ninguno de los 3 ensayos de arroz (frecuencia de 0%). En los sitios con respuesta a la aplicación de K, los rendimientos incrementaron hasta 35% en maíz, 28% en soja y 28% en trigo. En general, para soja, maíz y trigo, las respuestas significativas se verificaron con dosis de 60 kg K ha⁻¹ o superiores.

Tabla 3. Rendimientos en grano promedio (kg ha⁻¹) de arroz, maíz, soja y trigo para distintas dosis de potasio (kg K ha⁻¹) en los ensayos y franjas durante las campañas 2019/20, 2020/21 y 2021/22 en la zona MPT.

Table 3. Average grain yields (kg ha⁻¹) of rice, corn, soybean and wheat for different K rates (kg K ha⁻¹) in the trials and strips established in the 2019/20, 2020/21 and 2021/22 growing seasons in MPT zone.

Dosis de K (kg K ha ⁻¹)	0	30	50	60	90	120
Rendimiento (kg ha ⁻¹)						
2019						
Arroz						
Mercedes	10494	10486		10244	10795	
San Salvador	7243	7473		7642	8265	
Maíz						
El Rocío	4948 c	7002 b		6904 b		8185 a
Herrera	8986	9004		9963		10134
INTA Mercedes	4724 c	5924 b		6519 a		6872 a
La Concepción	5077	5903		6412		6514
San Martín	6482 b	6891 b		7726 a		7906 a
Soja						
DC San Martín	2869	2960		3182		3138
EEA INTA Mercedes	1537 b	1595 b		1704 a		1716 a
FS San Martín	1351 c	1654 b		1748 b		2040 a
La Concepción	1680	1650		1300		1707
Laurencena	1644 b	2420 a		2241 a		2024 ab
Nogoyá	1763	1951		2044		1811
San José	1540	1517		1475		1781
Victoria	2310	2253		2180		2116
2020						
Maíz						
Gualeduaychú	11432	10975		11276		11095
Trigo						
Gualeduaychú	4138	4670		4504	4713	
Mercedes	2667 b	3105 a		2770 b	2860 ab	
Nogoyá	3565	3436		3183	4005	
2021						
Arroz						
San Jaime	5771	5693		6308	6163	
Maíz						
El Chana	4390		4028			
El Rocío	6944 c	7214 c		8545 a		8081 b
Fadel HP	3554 b			3900 a		4088 a
Fadel LP	3194 b			3672 ab		3908 a

La China	6749		6824		
La Marianita	3679		3372		
Las 4 Marías	4856		5245		
Los O`Dwyer LP	1366 b			2142 a	2574 a
Los O`Dwyer MP	1662 b			1862 b	2705 a
San Juan	4626		4338		
San Martin	3106	3824		3869	4202
San Pedro Antelo	7664		6673		
Soja					
Barú	1552	1685		1609	1576
Barú residual	2254	2137		2383	2609
Pajonales	3545	3590		3530	3443
Perdices	2462	2419		2489	2586
Perdices residual	2616	2696		2286	2640
Trigo					
Barú AP	6824	6372		6753	6496
Barú BP	4987	5893		6293	6014
Barú MP	6218	5928		5596	6271
Guaquaychú	6003	6141		6218	6545
MSU Secano Maíz	3594 b			4124 a	
MSU Secano Soja	4261 b			4700 a	
MSU Riego Maíz	4156			4342	
MSU Riego Soja	4473			4637	
Perdices	4701 b	4734 b		5154 a	5152 a
Santa Cipriana Maíz	4547 b			4918 a	
Santa Cipriana Soja	4426 b			5349 a	

Letras distintas en una misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos para cada ensayo o franja, según el test LSD o la prueba t ($p < 0,10$).

En la zona RPC, las respuestas de los cultivos frente al agregado de K fueron significativas ($p < 0,10$) solamente en 4 de los 28 sitios evaluados (14%), ya que el ensayo de soja de 9 de Julio 2020 no pudo ser cosechado por pérdida del cultivo por sequía. Las respuestas se observaron en 2 de 8 ensayos en maíz (frecuencia de 25%, Ferré en 2020 y Gelly en 2021), 1 de 9 en soja (frecuencia de 11%, General Gelly en 2020) y 1 de 10 en trigo (frecuencia de 10%, 25 de Mayo en 2021) (Tabla 4). El ensayo de soja de Diego de Alvear 2019 mostró diferencias significativas entre tratamientos de fertilización, pero no con el Testigo sin K. En los 2 ensayos de maíz con respuesta, las mismas se observaron con dosis de 30 kg K ha⁻¹, mientras que, en el de trigo, la respuesta fue significativa con la dosis de 120 kg K ha⁻¹. En los sitios con respuesta, la aplicación de K resultó en incrementos de rendimiento del 7%, 9% y 64% en el cultivo de maíz, soja y trigo, respectivamente.

Tabla 4. Rendimientos en grano promedio (kg ha⁻¹) en función de la dosis de potasio (Kg K ha⁻¹) aplicada en soja, maíz y trigo en los ensayos realizados durante las campañas 2019/20, 2020/21 y 2021/22 en la zona RPC.

Table 4. Average grain yields (kg ha⁻¹) of soybean, corn, and wheat according to K rates (kg K ha⁻¹) for the trials carried out during 2019/20, 2020/21 and 2021/22 growing seasons in RPC zone.

Dosis de K (kg K ha ⁻¹)	0	30	60	90	120
Rendimiento (kg ha ⁻¹)					
2019					
Soja					
9 de Julio	2042	2447	2327		2219
Balcarce	3822	4185	4008		3960
Diego de Alvear	4226	4236	4202		4347
General Gelly	3392	3831	3737		3576
Oliveros	3412	3392	3371		3461
2020					
Maíz					
Arias	13550	13346	13276		12335
Balcarce	11243	10999	10400		10563
Ferré	11829 b	12655 ab	13356 a		12592 ab
Oliveros	10174	10378	10458		10113
Soja					
Alejo Ledesma	3165	3007	3252		3122
Balcarce	1278	1246	1748		1579
General Gelly	1255 b	1373 ab	1511 a		1331 ab
Oliveros	2569	2718	2642		2790
Trigo					
9 de Julio	4737	4660	4810		4763
Alejo Ledesma	4885	4694	4702		5215
Balcarce	7676	7632	7736		8310
General Gelly	4145	4132	4217		4253
Oliveros	775	976	971		966
2021					
Maíz					
Balcarce	11227	11510	11142		11189
Gelly	9898 b	10669 a	10743 a		10919 a
Marcos Juárez	9949	10320	10217		10232
Oliveros	7170	6969	7391		7326
Trigo					
25 de Mayo	3580 b	3520 b	4230 b		5888 a
Alejo Ledesma	5813	6021	5849	6149	
Balcarce	6602	6183	6521		6240
Oliveros	5909	6221	5961		5951
Pergamino	4965	5058	4856		4987

Letras distintas en una misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos para cada ensayo, según el test LSD (p<0,10).

Concentración de potasio en planta y grano: Se observaron diferencias significativas ($p>0,10$) en concentración de K en hojas al estado vegetativo entre Testigo y fertilizados solamente en 2 de los 11 sitios evaluados para los cuatro cultivos en ambas zonas: Maíz La Concepción 2019 y Soja San Martín 2019, ambos en MPT. No se observaron diferencias entre tratamientos de fertilización en concentraciones de K en hojas, para los cuatro cultivos, en el estado reproductivo (32 sitios evaluados) o en concentración de K en grano (35 sitios evaluados).

La distribución de promedios de la concentración de K en hojas y granos para los cuatro cultivos se presentan en las Figura 1 para la zona MPT y en la Figura 2 para la zona RPC. Las concentraciones de K son mayores en soja que en las gramíneas (arroz, maíz y trigo), especialmente en grano.

Los rangos de concentración de K en arroz fueron de 1,6-2,6%, 1,2-1,9% y 0,20-0,31% y los promedios de 2,1, 1,5 y 0,24% en estados vegetativo y reproductivo y en grano, respectivamente. Para maíz, los rangos de concentración de K fueron 0,6-2,8%, 1,3-2,2% y 0,18-1,00% y los promedios de 1,7, 1,65 y 0,32% en estados vegetativo y reproductivo y en grano, respectivamente. Los rangos de concentración de K en soja fueron 0,8-2,7%, 0,9-3,4% y 1,70-2,30% y los promedios de 2,1, 2,0 y 1,86% en estados vegetativo y reproductivo y en grano, respectivamente. Finalmente, en trigo, los rangos de concentración de K fueron 1,3-2,2% y 0,29-0,59% y los promedios de 1,65 y 0,45% en estado reproductivo y en grano, respectivamente.

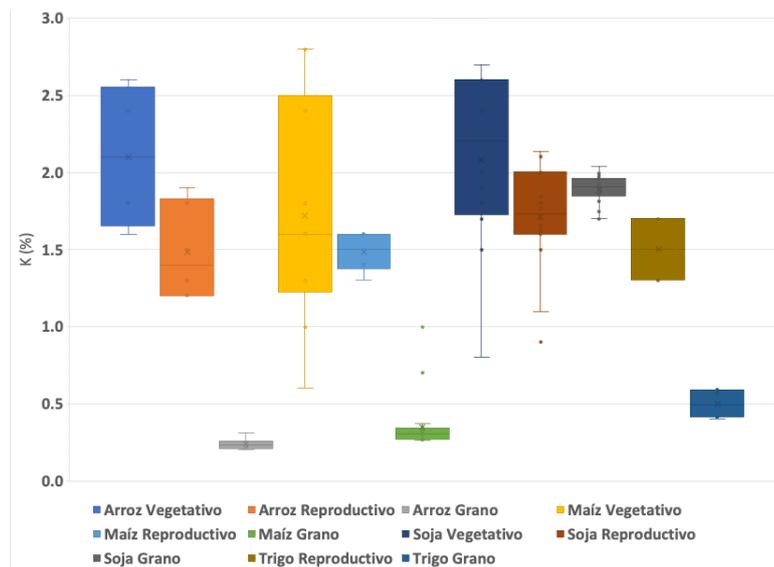


Figura 1. Concentración media de potasio (%) en hojas en el estado vegetativo y reproductivo, y en grano de arroz, maíz, soja y trigo en los experimentos de la zona MPT.

Figure 1. Average K concentration (%) in leaves of rice, maize, soybean, and wheat at the vegetative and reproductive stages, and in their grain in experiments of MPT zone.

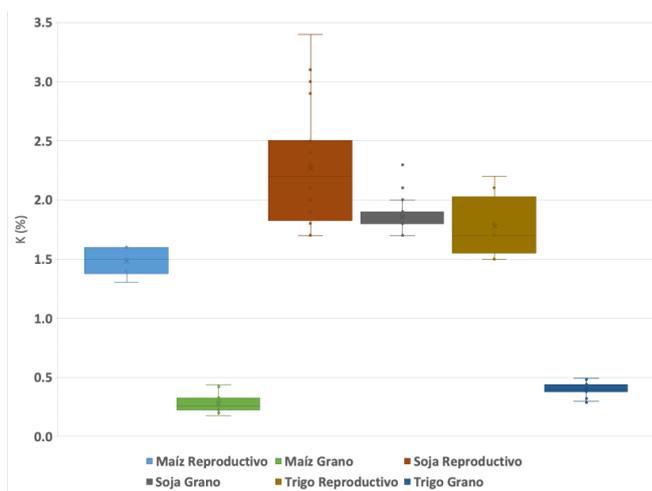


Figura 2. Concentración media de potasio (%) en hoja en el estado reproductivo y en grano de maíz, soja y trigo en los experimentos conducidos en la zona RPC.

Figure 2. Average K concentration (%) in leaves of maize, soybean and wheat at reproductive stage and in their grain in the trials of RPC zone.

Considerando los datos de las dos zonas, las concentraciones de K en hojas al estado vegetativo o reproductivo no se relacionaron con la respuesta al agregado de K en ningún cultivo. Por otra parte, la concentración de K en grano tendió a diluirse con los aumentos en los rendimientos, pero las relaciones negativas entre ambas variables fueron bajas ($r = -0,38, -0,55$ y $-0,57$ para maíz, soja y trigo, respectivamente).

La remoción de K en grano estimada es 2,4, 2,1 y 2,8 kg de K por tonelada de grano para arroz, maíz y trigo; respectivamente, mientras que para soja es 16,7 kg de K por tonelada de grano (Figura 3).

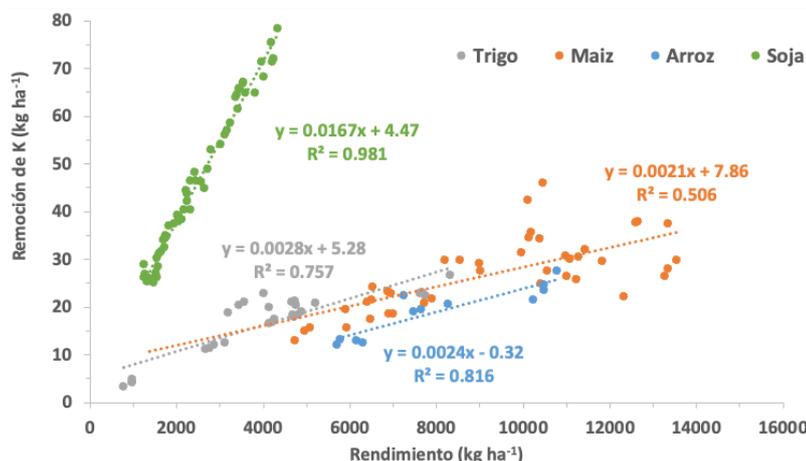


Figura 3. Remoción de K en grano en función del rendimiento en arroz (n=12), maíz (n=42), trigo (n=28) y soja (n=54).

Figure 3. Grain K removal as a function of yield of rice (n=12), corn (n=42), wheat (n=28) and soybean (n=54).

Calibración de análisis de suelo: Para los datos de las dos zonas, MPT (n=48) y RPC (n=27), la calibración entre los RR de los distintos cultivos y Kext muestra un rango crítico de Kext entre 157 y 213 mg kg⁻¹ (nivel crítico de 183 mg kg⁻¹), por debajo del cual hay una alta probabilidad que la disminución del rendimiento sea superior al 10% (Figura 4). Considerando este ajuste, la frecuencia de respuesta significativa a la ferti-

lización fue de 73% de los sitios con Kext menor a 157 mg kg⁻¹, mientras que el 92% de los sitios con Kext mayor a 213 mg kg⁻¹ no presentó respuesta significativa.

Como era de esperar, el Kext se relacionó positivamente con la saturación de K ($r=0,81$) y negativamente con la relación (Ca+Mg)/K ($r=-0,70$). Los RR se relacionaron directamente con la saturación de K de la CIC ($r=0,49$) e inversamente con la relación (Ca+Mg)/K ($r=-0,50$).

En el caso de Ksat, se pudo calibrar la relación con RR al igual que con Kext. La Figura 5 muestra esta relación entre Ksat y RR, estimándose un rango crítico de Ksat entre 1,9 y 2,9% (nivel crítico de 2,3%), por debajo del cual hay una alta probabilidad que la disminución del rendimiento sea superior al 10%. Considerando este ajuste, la frecuencia de respuesta significativa a la fertilización con K mayor al 10% en rendimiento, fue de 73% de los sitios con Ksat menor a 1,9%, mientras que el 86% de los sitios con Ksat mayor a 2,9% no presentó respuesta significativa.

La relación de RR con (Ca+Mg)/K fue significativa pero débil y no se pudo ajustar por método del arcoseno modificado. La tendencia ajustada por una ecuación lineal indicaría un valor de 17-21 de (Ca+Mg)/K para lograr el 90% de RR ($RR = -0,196*(Ca+Mg)/K + 93,8$ $R^2 = 0,25$, $n=58$).

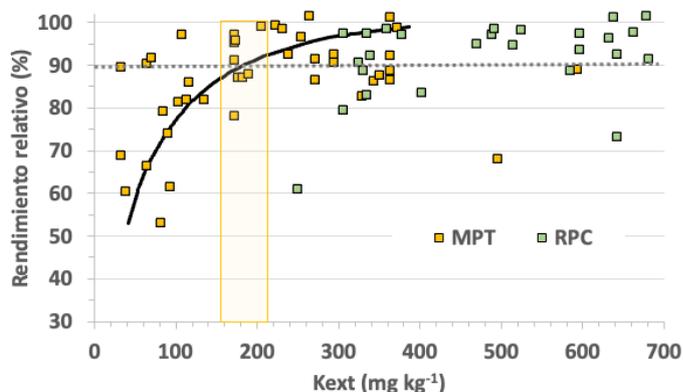


Figura 4. Relación entre el rendimiento relativo (Rendimiento testigo sin K/Rendimiento máximo con aplicación de K) y el valor de K intercambiable (Kext) de 75 ensayos y franjas con cultivos de soja, maíz, arroz y trigo en las zonas MPT y RPC. La curva de calibración (línea curva negra) se ajustó según el método del arco seno modificado (Correndo et al., 2017) (IC (90%) = 157-213 mg kg⁻¹; $r = 0,49$; $n = 75$) para el rango de Kext de 0 a 400 mg kg⁻¹. La franja amarilla vertical indica el intervalo de confianza del 90% para el rango crítico de K intercambiable, 157 - 213 mg K kg⁻¹ y la línea punteada horizontal representa un rendimiento relativo del 90%.

Figure 4. Relationship between relative yield (control yield without K/maximum yield with K application) and exchangeable K (Kext) for soybean, corn, rice and wheat from 75 trials and strips implemented in the MPT area. The calibration curve (black curved line) was fitted according to the modified arcsine method (Correndo et al., 2017) (CI (90%) = 157-213 mg kg⁻¹; $r = 0,49$; $n = 75$) for the range of Kext of 0 to 400 mg kg⁻¹. The vertical yellow bar indicates the 90% confidence interval for the critical range of exchangeable K, 157 - 213 mg K kg⁻¹ and the dashed horizontal line indicates a relative yield of 90%.

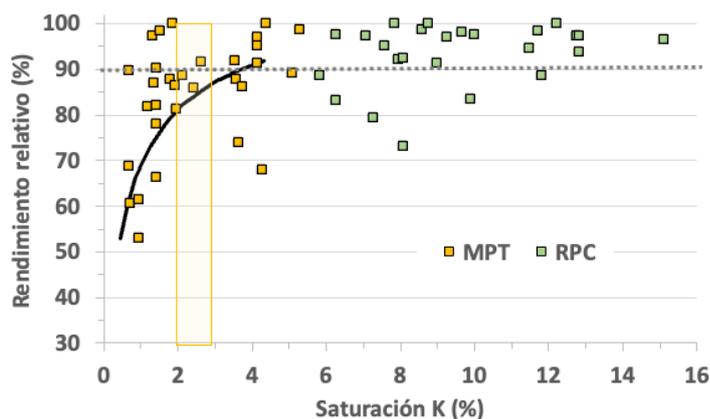


Figura 5. Relación entre el rendimiento relativo (Rendimiento testigo sin K/Rendimiento máximo con aplicación de K) y el valor de saturación de K de 56 ensayos y franjas con cultivos de soja, maíz, arroz y trigo en las zonas MPT y RPC. La curva de calibración (línea curva negra) se ajustó según el método del arco seno modificado (Correndo et al., 2017) (IC 90%) = 1,9-2,9%; $r = 0,44$; $n = 56$) para el rango de saturación de K de 0 a 4,4%. La franja amarilla vertical indica el intervalo de confianza del 90% para el rango crítico de saturación de K, 1,9-2,9%, y la línea punteada horizontal representa un rendimiento relativo del 90%.

Figure 5. Relationship between relative yield (control yield without K/maximum yield with K application) and K saturation for soybean, corn, rice and wheat from 56 trials and strips implemented in the MPT area. The calibration curve (black curved line) was fitted according to the modified arcsine method (Correndo et al., 2017) (CI 90%) = 1,9-2,9%; $r = 0,44$; $n = 56$) for the range of K saturation of 0 to 4,4%. The vertical yellow bar indicates the 90% confidence interval for the critical range of exchangeable K, 1,9-2,9%, and the dashed horizontal line indicates a relative yield of 90%.

DISCUSIÓN

Los valores de pH, MO, CIC, cationes y micronutrientes de los sitios incluidos en este trabajo se ubican dentro de los rangos citados para las dos regiones MPT y RPC (Tablas 1 y 2) (Herrera y Rotondaro, 2017; Sainz Rozas et al., 2019). Los sitios de estudio presentaron un amplio rango de Kext, Ksat y relación (Ca+Mg)/K reflejando distintas condiciones de suelo y de manejo en las dos zonas. Las diferencias en contenido de K entre suelos de la región pampeana argentina fueron indicadas por De la Horra y Mizuno (1974) y Morras y Cruzate (2001).

En la zona MPT, 31% de los sitios presentó niveles de Kext menores a 150 mg kg^{-1} , un valor promedio de los indicados como nivel crítico por varios autores en suelos de características similares (Barbazán et al., 2011; Wortmann et al., 2009; Barbagelata y Mallarino, 2012; Lyons et al., 2023; Mallarino et al., 2023). Los sitios de menor Kext se concentraron hacia el este de Entre Ríos y Corrientes, en áreas indicadas como de bajo nivel de K en el relevamiento de Sainz Rozas et al. (2019) y de menor contenido de K total según Morras y Cruzate (2001). Por el contrario, en la zona RPC, ninguno de los sitios presentó valores de Kext por debajo de los niveles críticos generalmente reportados en la literatura.

En la zona MPT, un 33% de los datos de Ksat se ubicó por debajo y un 27% dentro del rango de 2 a 5% indicado por Vázquez y Pagani (2014) como umbral para diagnosticar deficiencias de K en el suelo; y, en todos los casos, la relación (Ca+Mg)/K fue superior al rango óptimo sugerido de 7 a 11 (Vázquez y Pagani, 2014). Por el contrario, en la zona RPC, la Ksat fue mayor al rango recomendado en todos los sitios, mientras que la relación (Ca+Mg)/K fue menor o similar al rango óptimo. Considerando todos los sitios, el Kext se relacionó positivamente con materia orgánica ($r=0,54$, $p<0,05$), pero no se relacionó con el pH, la CIC y las concentraciones de Ca y Mg. Las relaciones entre bases en el complejo de intercambio con el fin de establecer deficiencias de algunos cationes para la nutrición vegetal han sido ampliamente discutidas en la literatura (Kopittke y Menzies, 2007; Chaganti y Culman, 2018), con resultados contradictorios según cada estudio. Por lo tanto, para realizar un manejo adecuado de los nutrientes sería apropiado evaluar los valores críticos de los distintos cationes y/o establecer relaciones para cada zona en particular (Culman et al., 2021).

Las respuestas de rendimiento en grano de los cultivos fueron más frecuentes en la zona MPT, donde el 37% de los ensayos/franjas tuvieron respuesta positiva a la aplicación de K en comparación con solo el

14% en la RPC (Tabla 3 y 4). Así, en la zona MPT se observaron respuestas significativas ($p < 0,10$) en maíz, soja y trigo, especialmente en los ensayos ubicados en las regiones del sur de Corrientes y aledañas al Río Uruguay en Entre Ríos. Si bien estas respuestas son variables en cuanto a incrementos de rendimiento (28-35%), las mismas son similares a las observadas por Melgar et al. (1996) para Corrientes y a las reportadas en Uruguay por Barbazán et al. (2017), en Paraguay por Wendling et al. (2008), en Brasil por Vieira et al. (2016), y en otros países (Wortmann et al., 2009; Niu et al., 2011; Culman et al., 2023). Como también fue observado por Barbazán et al. (2017) en Uruguay y por Culman et al. (2023) en Ohio (EE. UU.), el maíz presentó una mayor frecuencia de respuesta y un mayor incremento de rendimiento que la soja. Los tres sitios bajo arroz en el sur de Corrientes y este de Entre Ríos, los cuales no tuvieron respuesta positiva al agregado de K, presentaron niveles de Kext similares o superiores a los indicados como deficientes por Méndez et al. (2001) para arroz en Corrientes y por Slaton et al. (2009) para la zona arrocería del sur de EE. UU.

Con respecto a la zona RPC, los incrementos significativos ($p < 0,10$) de rendimiento en grano en maíz, soja y trigo por aplicación de K se registraron en cuatro ensayos localizados en el centro-norte de la provincia de Buenos Aires y sur de Santa Fe, a pesar de tener contenidos de Kext que superaron los umbrales críticos de deficiencia mencionados en bibliografía. Los sitios con respuesta en maíz (Ferré, año 2020 y General Gelly, año 2021) y en soja (General Gelly, año 2020), si bien tenían altos niveles de Kext (325-585 mg kg⁻¹), presentaban condiciones de degradación física severa debido a la erosión y al manejo de agricultura continua (Casas et al., 2022), probablemente con muchos años previos de labranza, condiciones mencionadas como predisponentes a la respuesta a K (Askegaard et al., 2004; Römheld y Kirkby, 2010). El sitio con respuesta en trigo (25 de Mayo, año 2021) presentó nivel medio de Kext (235 mg kg⁻¹) y un alto porcentaje de arena, condiciones también predisponentes para la respuesta a K con altos rendimientos (Askegaard et al., 2004; Culman et al., 2023).

La respuesta del rendimiento en grano a la aplicación de K estuvo relacionada con el Kext, estimándose un rango crítico de 157-213 mg kg⁻¹ (nivel crítico 183 mg kg⁻¹) para lograr 90% del RR con un intervalo de confianza de Kext del 90% según el método estadístico arco seno-logaritmo modificado (Correndo et al., 2017) (Figura 4). El rango crítico de Kext es similar al indicado por investigaciones previas en Uruguay (Barbazán et al., 2011) y EE. UU. (Lyons et al., 2023; Mallarino et al., 2023) y ligeramente superior al sugerido por Culman et al. (2023) para Ohio.

Se han reportado varios factores que pueden afectar la relación entre la respuesta del rendimiento en grano a la aplicación de K con el Kext (0-20 cm), entre ellos la tasa de reabastecimiento de K hacia las raíces, las diferencias en sistemas radiculares entre cultivos, la variabilidad en textura y mineralogía de suelos, el aporte de fracciones de K del suelo no intercambiables y/o el aporte de K del subsuelo (Römheld y Kirkby, 2010; Bell et al., 2021; Hinsinger et al., 2021). El aporte de fracciones no intercambiables de K del suelo, evaluado a través de extracciones con tetrafenilborato de sodio, ha permitido una mejor caracterización de deficiencias de K en suelos de mineralogía similar a las de MPT y RPC (Zubillaga y Conti, 1996; Nuñez y Morón, 2017; Ferrando et al., 2020; Bell et al., 2021). Por otra parte, una alta proporción del K absorbido por los cultivos puede provenir del subsuelo (más de 20 cm), especialmente en situaciones de bajo Kext a 0-20 cm (Kulhman, 1990; Scanlan et al., 2024). En suelos argiudoles y hapludoles del sur de Santa Fe y sur de Córdoba, Correndo et al. (2021) indicaron que el muestreo de capas subsuperficiales de suelo podría ser necesario para determinar las necesidades de reposición de K en suelos con altos niveles de Kext a 0-20 cm de profundidad en la región pampeana. La evaluación de aportes de K de fracciones no intercambiables y/o del Kext en el subsuelo serían variables para considerar en futuras investigaciones de respuesta a K, especialmente en RPC.

La saturación con K y la relación (Ca+Mg)/K se relacionaron con los RR y respuestas a K en MPT, sin embargo, no se comportaron mejor que Kext para distinguir sitios deficientes y suficientes. La relación de Ksat con RR permitió estimar un rango crítico de 1.9-2.9% para alcanzar el 90% del rendimiento máximo (Figura 5), valor ubicado dentro de los rangos mencionados como óptimos por Vázquez y Pagani (2014) y Culman et al. (2021). En el caso de la relación (Ca+Mg)/K, el valor de 18-20 para alcanzar el 90% del rendimiento máximo es muy superior a la referencia de 7-11 de Vázquez y Pagani (2014). Estas relaciones encontradas de RR con Ksat y, en menor medida, con relación (Ca+Mg)/K podrían ser referencias para una evaluación más detallada de las mismas en futuros estudios, considerando los altos niveles de Ca intercambiable, escenario habitual en muchos suelos de la provincia de Entre Ríos (Quintero y Arévalo, 2006; Quintero y Figueroa, 2008). Por otra parte, a nivel global se dispone de poca información y existe poca coincidencia en su utilidad como herramienta de diagnóstico (Kopitke y Menzies, 2007; Wood y Litterick, 2017; Chaganti y Culman, 2018; Culman et al., 2021).

Las concentraciones de K en hojas al estado vegetativo y al estado reproductivo en los tres sitios de arroz en MPT se ubicaron dentro de los umbrales indicados por Malavolta et al. (1997), Jones (1998) y Dobermann y Fairhurst (2000), pero la concentración en grano se ubicó en valores por debajo de los referidos por estos autores.

Las concentraciones de K en estado reproductivo de maíz, soja y trigo fueron similares entre ambas zonas o levemente superiores en RPC que en MPT, pero las concentraciones de K en grano tendieron a ser mayores en MPT que en RPC para estos tres cultivos. Para ambas zonas, en general, las concentraciones de K se ubicaron por debajo o en el rango crítico indicado en la bibliografía en estados vegetativo y reproductivo en maíz (Voss, 1993; Malavolta et al., 1997; Jones, 1998; Miller et al., 2017), pero fueron superiores a los indicados por Stammer y Mallarino (2018). En soja y trigo, las concentraciones determinadas fueron algo superiores o dentro de los rangos críticos de referencia en estados vegetativo y reproductivo y en grano (Malavolta et al., 1997; Jones, 1998; Stammer y Mallarino, 2018; Slaton et al., 2021).

La fertilización con K no tuvo efecto en la concentración de K en ambos muestreos foliares (vegetativo y reproductivo) y en grano, independientemente de la respuesta en rendimiento en grano (Tablas 3 y 4). Los resultados en general fueron inconsistentes, en algunos cultivos como maíz y soja, la concentración de K del tejido foliar tendió a incrementar con la fertilización potásica en comparación con las concentraciones logradas en grano. En coincidencia, Zone et al. (2020) demostraron que la concentración de K en hojas de maíz y trigo tendieron a responder más a la fertilización con K que el grano, sugiriendo que las hojas son un indicador justificado de la absorción de nutrientes por los cultivos. Clover et al. (2007) y Mallarino y Higashi (2009) también reportaron que la fertilización con K incrementó la concentración de este nutriente en las hojas de maíz y soja en mayor medida que en grano.

La concentración de K en los dos estados fisiológicos, vegetativo y reproductivo, de arroz, maíz y trigo superó ampliamente a la concentración alcanzada en los granos, revelando el bajo índice de cosecha de K de los cereales; mientras que la soja presentó una mayor concentración de K en grano que los cereales y una menor diferencia de concentración con respecto a estados vegetativos y reproductivo a partir de un mayor índice de cosecha de K (Quintero, 2009; Gaspar et al., 2017; Broberg et al., 2021; Carciocchi et al., 2025).

Los valores de concentración de K en grano se ubicaron dentro de los rangos inferiores reportados en los cuatro cultivos por Carciocchi et al. (2025), y por otros autores en arroz (Quintero, 2009), maíz (García et al., 2023), soja (Salvagiotti et al., 2021; Filippi et al., 2021) y trigo (Beaton y Sekhon, 1985).

Si bien las concentraciones de K en grano disminuyeron levemente con los incrementos de rendimiento, un efecto de dilución, la remoción total de K en grano dependió principalmente del rendimiento de los cultivos (Figura 3) (Carciocchi et al., 2025). Estos valores de remoción de K en grano constituyen una referencia local para la estimación de balances de K para los cuatro cultivos.

CONCLUSIONES

Esta red de ensayos y franjas exploratorias de deficiencia de K y respuesta a la fertilización potásica permitió determinar y caracterizar áreas y condiciones de respuesta a K en cultivos extensivos en las zonas MPT y RPC.

Los resultados de los ensayos y las franjas experimentales realizados en la zona MPT confirman la deficiencia de K en cultivos extensivos en el sur de Corrientes y este de Entre Ríos. En la zona RPC, se observaron deficiencias y respuestas a K en algunos sitios de suelos de textura más arenosa o en situaciones de degradación física, química y biológica.

Se estableció una calibración para el análisis de K_{ext} y los rendimientos relativos que indica un rango de 157-213 mg kg⁻¹ por debajo del cual la probabilidad de respuesta a la fertilización potásica es alta. La determinación de K_{ext} puede ser complementada con parámetros como la K_{sat} para detectar lotes/ambientes de deficiencia probable.

Los análisis de planta, foliares o de grano, no permitieron diferenciar las situaciones sin y con deficiencia. Las remociones de K en grano estimadas para los cuatro cultivos pueden ser utilizadas para determinar balances de K. Los sistemas de producción con alta intensidad o participación de soja en la secuencia de cultivos deben poner especial atención a la disminución del K en suelo debido a la alta extracción que realiza este cultivo.

En los sistemas productivos de MPT, el diagnóstico de fertilidad potásica y las necesidades de aplicación de K resultantes deben ser incluidas en el manejo de suelos y cultivos. Investigaciones futuras deberán generar información y recomendaciones de dosis, fuentes, formas y momentos correctos para estos sistemas.

En RPC, si bien la disponibilidad de K de la mayoría de los suelos evaluados es adecuada, la casi nula reposición de K vía fertilizantes minerales y/o abonos orgánicos, resultaría en caídas de Kext que llevarían a situaciones de deficiencia en los próximos años. El monitoreo de los suelos a través de los análisis correspondientes, así como también la evaluación de respuestas mediante redes exploratorias constituyen herramientas válidas para anticipar la toma de decisiones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen especialmente a todos los productores, asesores y personal de establecimientos donde se realizaron los ensayos. Esta red experimental fue financiada por Fertilizar AC, Uralkali, Nitron y CANPOTEX, con la participación de las EEAs INTA Balcarce, Concepción del Uruguay y Mercedes, las Facultades de Ciencias Agropecuarias-UNER y de Ciencias Agrarias-UNMDP y el CONICET.

REFERENCIAS

- Askegaard, M., Eriksen, J., y Johnston, A. E. (2004). Sustainable management of potassium. En P. Schjonning, S. Elmholt y B.T. Christensen (Eds.), *Managing soil quality: challenges in modern agriculture* (pp. 85-102). Wallingford UK: CABI Publishing.
- Barbagelata, P. y Mallarino, A. (2012). Field correlation of potassium soil test methods based on dried and field-moist soil samples for corn and soybean. *Soil Science Society of American Journal*, 77, 318-327. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0253>
- Barbazán, M.M., Boutes, C., Beux, L., Bordoli, J.M., Cano, J., Ernst, O., García, A., García, F. O. y Quincke, A. (2011). Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay: rendimiento según análisis de suelos. *Agrociencia Uruguay*, 15 (2), 93-99.
- Barbazán, M., Bordoli, M., del Pino, A., Ferrando, M., Ernst, O., Hoffman, E., Mazzilli S., Rocha, L., y García, F. O. (2017). Assessment of potassium deficiencies in agricultural systems in Uruguay. En International Plant Nutrition Institute (Ed.) *Abstracts of the Frontiers of Potassium Science Conference*, Roma, Italia, January 2017. <https://www.apni.net/k-frontiers/>
- Beaton, J. D. y Sekhon, G. S. (1985). Potassium nutrition of wheat and other small grains. En R.D. Munson (Ed.) *Potassium in Agriculture* (pp. 701-752). American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Bell, M.J., Thompson, M.L. y Moody, P.W. (2021). Using soil tests to evaluate plant availability of potassium in soils. En: T. S. Murrell, R. L. Mikkelsen, G. Sulewski, R. Norton, M. L. Thompson. (Eds). *Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops* (pp. 191-218). Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59197-7>
- Bray, R. H. y Kurtz, L. T. (1945). Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59(1), 39-45.
- Broberg, M. C., Xu, Y., Feng, Z., y Pleijel, H. (2021). Harvest index and remobilization of 13 elements during wheat grain filling: experiences from ozone experiments in China and Sweden. *Field Crops Research*, 271, 108259. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108259>
- Brownlie, W, Alexander, P, Maslin, M, Cañedo-Argüelle, M, Sutton, M y Spears, B. (2024). Global Food Security Threatened by Potassium Neglect. *Nature Food*. <https://doi.org/10.1038/s43016-024-00929-8>
- Carciochi, W. D., Dobermann, A., La Menza, N. C., Brouder, S. M., Donough, C. R., Heuschele, D. J., Oberthur, T., Sandaña, P., Shehu, B. M., Pereira, J. T. S., Soratto, R. P., Voleenec, J. J., Wandri, R., Wang, Y., Win, S. S., He, P. y Grassini, P. (2025). Quantifying potassium requirement and removal across crop species. *Field Crops Research*, 322, 109717. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109717>
- Carrizo, M. E., Pilatti, M.A., Alesso, C.A. e Imhoff, S. (2011). Atributos químicos de suelos argiudoles cultivados y no cultivados del Departamento Las Colonias (Santa Fe). *Ciencia del Suelo*, 29(2), 173-179. <https://www.ojs.suelos.org.ar/index.php/cds/article/view/14>.
- Casas, R. R., Godagnone, R. E. y de la Fuente, J.C. (2022). Evaluación y cartografía de la erosión hídrica en la Argentina. *Revista de Investigaciones Científicas de la Universidad de Morón*, 6(11), 24-38. <http://doi.org/10.34073/285>
- Chaganti, V. N. y Culman, S. W. (2018), Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. *Crops and Soils*, 51: 40-47. <https://doi.org/10.2134/cs2018.51.0101>
- Clover, M. W., Mallarino, A. P. y Barbagelata, P. (2007). *Corn and soybean grain yield and concentration of potassium in plant tissues and soil as affected by potassium fertilization*. North Central Extension-Industry Soil Fertility Conference, 23, 119-125. Department of Agronomy, Iowa State University, Des Moines, IA.
- Conti, M. E., de la Horra, A. M., González, M. G., Arrigo, N. y García, F. O. (2001). Monitoreo de los cambios en la fertilidad potásica de haplodos típicos de la región pampeana fertilizados para agricultura de alto rendimiento. En *Actas 1er. Simposio "El Potasio en Sistemas Agrícolas Argentinos"* (pp 53-56). FAUBA-Fertilizar INTA.
- Correndo, A. A., Salvagiotti, F., García, F. O. y Gutiérrez Boem, F. H. (2017). A modification of the arcsine–log calibration curve for analysing soil test value–relative yield relationships. *Crop and Pasture Science*, 68(3), 297-304. <http://dx.doi.org/10.1071/CP16444>
- Correndo, A.A., Rubio, G., García, F.O. y Ciampitti, I.A. (2021) Subsoil-potassium depletion accounts for the nutrient budget in high-potassium agricultural soils. *Scientific Reports*, 11(1), 11597. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90297-1>

- Correndo, A. A., Pearce, A., Bolster, C. H., Spargo, J. T., Osmond, D. y Ciampitti, I. A. (2023). The soiltestcorr R package: an accessible framework for reproducible correlation analysis of crop yield and soil test data. *SoftwareX*, 21, 101275. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2022.101275>
- Culman, S. W., Brock, C., Doohan, D., Jackson-Smith, D., Herms, C., Chaganti, V. N., Kleinhenz, M., Sprunger, C.D., y Spargo, J. (2021). Base cation saturation ratios vs. sufficiency level of nutrients: A false dichotomy in practice. *Agronomy Journal*, 113, 5623–5634. <https://doi.org/10.1002/agj2.20787>
- Culman, S., Fulford, A., LaBarge, G., Watters, H., Lindsey, L. E., Dorrance, A. y Deiss, L. (2023). Probability of crop response to phosphorus and potassium fertilizer: Lessons from 45 years of Ohio trials. *Soil Science Society of America Journal*, 87(5), 1207-1220. <https://doi.org/10.1002/saj2.20564>
- De la Horra, A. M. y Mizuno, I.. 1974. Potasio en algunos suelos argentinos. *Anales de la Sociedad Científica Argentina*, tomo CXCVIII:87-93.
- Dhillon, J. S., Eickhoff, E. M., Mullen, R. W. y Raun, W. R. (2019). World potassium use efficiency in cereal crops. *Agronomy Journal*, 111, 889-896. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.07.0462>
- Díaz-Zorita, M., Duarte, G. A. y Barraco, M. (2004). Effects of chloride fertilization on wheat (*Triticum aestivum* L.) productivity in the sandy Pampas region, Argentina. *Agronomy Journal*, 96, 839-844. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0839>
- Dobermann, A. y Fairhurst, T. (2000) *Rice: Nutrient disorders and nutrient management*. Handbook Series, Potash y Phosphate Institute (PPI), Potash and Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Rice Research Institute, Philippine.
- Ferrando, M. G., Barbazán, M. M., García, F. O., y Mallarino, A. P. (2020). Comparison of the ammonium acetate, Mehlich 3, and sodium tetraphenylboron as extractants to evaluate crop available potassium. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(8), 997–1005. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1744625>
- Filippi, D., Denardin, L.G. de O., Ambrosini, A., Alves, L. A., Flores, J. P. M., Martins, A. P., Pias, O. H. de C. y Tiecher, T. (2021). Concentration and removal of macronutrients by soybean seeds over 45 years in Brazil: a meta-analysis. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 45, e0200186. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20200186>
- García, F. O. (2008). Cloro en trigo: Resultados de las experiencias en la región pampeana argentina. Años 2001 a 2006. *Informaciones Agronómicas*, 38,17-21. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2008/06/4.pdf>
- García, F. O. y González Sanjuan, M. F. (2016). Consumo de fertilizantes en el mundo y en la Argentina. En R. S. Lavado (Ed.). *Sustentabilidad de los agroecosistemas y uso de fertilizantes* (pp. 61-84). AACs-OGE-Fertilizar A.C.
- García F. O., Correndo, A. A., Reussi Calvo, N. I., Monzón, J. P., Ciampitti I. A. y Salvagiotti, F. (2023). Nutrición del cultivo. En F.H. Andrade, M. E. Otegui, A. Cirilo y S. Uhart (Eds.). *Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz* (pp. 175-220) 1a ed. - Balcarce. https://www.Maizar.org.ar/documentos/cultivo%20de%20Maiz_version%20digital.pdf
- Gaspar, A. P., Laboski, C. A. M., Naeve, S. L. y Conley, S. P. (2017). Phosphorus and Potassium Uptake, Partitioning, and Removal across a Wide Range of Soybean Seed Yield Levels. *Crop Science*, 57, 2193-2204. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.05.0378>
- Herrera, A. y Rotondaro, R. (2017). Relevamiento de fertilidad de los suelos pampeanos ¿Qué nos dicen los análisis de suelo? *Informaciones Agronómicas*, 28, 24-27. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2021/09/Art-5.pdf>
- Hinsinger, P., Bell, M. J., Kovar, J. L., y White, P. J. (2021). Rhizosphere Processes and Root Traits Determining the Acquisition of Soil Potassium. En T. S. Murrell, R. L. Mikkelsen, G. Sulewski, R. Norton y M. L. Thompson (Eds) *Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59197-7_4
- Jones, Jr., J. B. (1998). *Plant Nutrition Manual*. CRC Press. Boca Raton. Florida. USA.
- Kopitke, P. M. y Menzies, N. I. W. (2007). A Review of the use of the basic cation saturation ratio and the "ideal" soil. *Soil Science Society of American Journal*, 71(2), 259-265. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0186>
- Kowalenko, C. J. y Grimmett, M. (2008). Chemical characterization of soil sulphur. En M. R. Carter y E. G. Gregorich (Eds.). *Soil Sampling and Methods of Analysis* (pp.251-264). Second Edition, Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Kuhlmann, H. (1990). Importance of the subsoil for the potassium nutrition of crops. *Plant and Soil*, 127, 129-136. <https://doi.org/10.1007/BF00010845>
- Larrea, G., Wyngaard, N., Eyherabide, M., Reussi Calvo, N., Puricelli, M., Barbieri, P., Angelini, H. P., Salvagiotti, F. y Sainz Rozas, H. (2023). Cation nutrient reserves decline markedly under intensive cropping of Pampas Mollisols. *Catena*, 223(3-4), 106916. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106916>
- Lindsay, W. L. y Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42, 421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
- Lyons, S. E., Clark, J. D., Osmond, D. L., Parvej, M. R., Pearce, A. W., Slaton, N. A., y Spargo, J. T. (2023). Current status of US soil test phosphorus and potassium recommendations and analytical methods. *Soil Science Society of America Journal*, 87, 985–998. <https://doi.org/10.1002/saj2.20536>
- Malavolta, E., Vitti, G. C., e de Oliveira, S. A. (1997). *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. 2da Ed. rev e atual. POTAFOS. Piracicaba-SP.
- Mallarino, A. P. y Higashi, S. L. (2009). Assessment of potassium supply for corn by analysis of plant parts. *Soil Science Society of America Journal*, 73(6), 2177-2183. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0370>

- Mallarino, A. P., Sawyer, J. E., Barnhart, S. K., y Licht, M. A. (2023). *A General Guide for Crop Nutrient and Limestone Recommendations in Iowa*. PM 1688 Revised February 2023. Iowa State University. Ames, Iowa, US.
- Marchi, A., Conti, M. E., González, M. G. y de la Horra, A. M. (1995). Potasio intercambiable mínimo en Molisoles de la región pampeana argentina. *Agrochimica*, 39(2-3),169-176.
- Matula, J. (2009). Boron sorption in soils and its extractability by soil tests (Mehlich 3, ammonium acetate and water extraction). *Plant, Soil and Environment*, 55(1), 42–49.
- Méndez M. A., Melgar, R. J., Morales, L. y Sanabria, M. C. (2001). Respuesta del arroz al potasio en la provincia de Corrientes. *Actas 1er. Simposio "El potasio en sistemas agrícolas argentinos"* (pp. 85-91). FAUBA-Fertilizar INTA. ISBN 987-521-056-0.
- Melgar, R. J., Figueroa, M. M. y Sanabria, M. C. (1996). Efecto residual de aplicaciones de potasio en molisoles de Corrientes (Argentina). *Ciencia del Suelo*, 14(2), 76-78.
- Melgar R. J., Méndez, M. A., Figueroa, M. M., Sanabria, M. C. y Giménez, L. (1994). Efecto del nitrógeno y el potasio sobre el rendimiento de fibra, capsula y biomasa total del algodón en Corrientes. *Ciencia del Suelo*, 12, 68-74.
- Melgar R. J., Magen, H., Camozzi, M. E. y Lavandera, J. (2001). Respuesta del trigo a la aplicación de cloruro de potasio en molisoles con alto contenido de potasio. *Actas 1er. Simposio "El potasio en sistemas agrícolas argentinos"* (pp.13-20). FAUBA-Fertilizar INTA.
- Miller, R. O., Smith, T., Bower, B., y Struve, C. (2017). *Observational Data Analysis of Soil Fertility and Leaf Analysis on Maize Grain Yield in the Central United States*. En *International Plant Nutrition Institute (ed) Abstracts of the Frontiers of Potassium Science Conference, Roma, Italia, Enero 2017*. <https://www.apni.net/k-frontiers/>
- Morrás, H. y Cruzate, G. (2001). Origen y distribución del potasio en suelos de la región Chaco-pampeana. *Actas 1er. Simposio "El potasio en sistemas agrícolas argentinos"* (pp. 73-84). FAUBA-Fertilizar INTA. ISBN 987-521-056-0.
- Moscatelli, G., Lutens, J. A. y Gómez, L. A. (2001). Niveles de disponibilidad y reservas de potasio en Argentina. *Actas 1er. Simposio "El potasio en sistemas agrícolas argentinos"* (pp. 35-48). FAUBA-Fertilizar INTA.
- Nelson, D. W. y Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. En D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston y M. E. Sumner (Eds.). *Methods of soil analysis. Part 3, Chemical Methods* (pp. 961-1010). Soil Science Society of America Book Series No. 5, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>
- Niu, J., Zhang, W., Chen, X., Li, C., Zhang, F., Jiang, L., Liu, Z., Xiao, K., Assaraf, M. y Imas, P. (2011). Potassium Fertilization on Maize under Different Production Practices in the North China Plain. *Agronomy Journal*, 103, 822-829. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0471>
- Núñez, A. y Morón, A. (2017). Potassium Dynamics in Western Uruguayan Agricultural Mollisols. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(21), 2558–2572. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1416134>
- Pérez Zamora, F. (2014). Caña de azúcar. En H. E. Echeverría y F. O. García (Eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos* (pp.609-628). INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Quintero, C. (2009). *Factores limitantes para el crecimiento y productividad del arroz en Entre Ríos, Argentina*. Tesis Doctoral. Ediciones de la Fundación para el Desarrollo Agropecuario. <http://hdl.handle.net/2183/5680>. ISBN: 978-84-692-8861-0.
- Quintero, C. y Arévalo, E. (2006). Capítulo III.5. Producción de arroz en suelos calcáreo. En *El arroz. Su cultivo y sustentabilidad en Entre Ríos* (pp. 393-405). Universidad Nacional de Entre Ríos y Universidad Nacional del Litoral.
- Quintero, C. y Figueroa, E. (2008). Fertilización de arroz. En Melgar, R.J. y Diaz Zorita, M. (Ed.). *Fertilización de cultivos y pasturas* (pp. 244-260), 2da edición, Ed. Hemisferio Sur.
- Richter, M., Conti, M. y Maccarini, G. (1982). Mejoras en la determinación de cationes intercambiables y capacidad de intercambio catiónico en los suelos. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 3(2), 145-155
- Römheld, V., y Kirkby, E. A. (2010). Research on potassium in agriculture: needs and prospects. *Plant and Soil*, 335, 155-180. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0520-1>
- Sainz Rozas, H., Eyherabide, M., Larrea, G., Martínez Cuesta, N., Angelini, H., Reussi Calvo, N. y Wyngaard, N. (2019). Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. *Actas Simposio Fertilidad 2019* (pp.141-158). Fertilizar, Rosario, Santa Fe, Argentina.
- Salvagiotti, F., Magnano, L., Ortez, O., Enrico, J., Barraco, M., Barbagelata, P., Condori, A., Di Mauro, G., Manlla, A., Rotundo, J., García, F. O., Ferrari, M., Gudelj, V., y Ciampitti, I. (2021). Estimating nitrogen, phosphorus, potassium, and sulfur uptake and requirement in soybean. *European Journal of Agronomy*, 127(4): 126289. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126289>.
- Scanlan, C. A., Bell, R., Cheng, M. y Boyes, T. (2024). Subsoil testing required to detect the rundown of soil potassium to deficient levels for wheat production on loam-textured soils. *Crop and Pasture Science*, 75, CP2419. <https://doi.org/10.1071/CP24195>.
- Soil Survey Staff. (1999). *Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. 2nd edition. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 436.
- Slaton N., Golden, B., Norman, R., Wilson, C., y De Long, R. (2009). Correlation and calibration of soil potassium availability with rice yield and nutritional status. *Soil Science Society of America Journal*, 73,1192-1201. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0200>
- Slaton, N. A., Drescher, G. L., Parvej, M. d. R., y Roberts, T. L. (2021). Dynamic critical potassium concentrations in soybean leaves and petioles for monitoring potassium nutrition. *Agronomy Journal*; 113, 5472–5482. <https://doi.org/10.1002/agj2.20819>

- Stammer, A. J. y Mallarino, A. P. (2018), Plant Tissue Analysis to Assess Phosphorus and Potassium Nutritional Status of Corn and Soybean. *Soil Science Society of America Journal*, 82, 260-270. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.06.0179>
- The Fertilizer Institute. (2020). *Soil Test Levels in North America: Summary Update*. <https://soiltest.tfi.org/>
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. En D.L Sparks (Eds.) *Methods of Soil Analysis Part 3: Chemical methods*, (pp. 475-490). Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
- Vázquez, M. S. y Pagani, A. (2014). Calcio y magnesio. Manejo de fertilización y enmiendas. En H. E. Echeverría y F. O. García (Eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos* (pp.317-355). INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Vieira, R. C. B., Fontoura S. M. V., Bayer, C., Moraes, R. P., y Carniel E. (2016). Potassium fertilization for long term no-till crop rotation in the central-southern region of Paraná, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 40, e0150193. <https://doi.org/10.1590/18069657-BCS20150193>
- Wendling, A., Eitz, F. L. F., Cubilla, M. M., Carneiro Amado, T. J. y Mielniczuk, J. (2008). Recomendação de adubação potássica para trigo, milho e soja sob sistema plantio direto no Paraguai. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(5), 1929-1939. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500014>
- Wood, M. y Litterick, A. M. (2017). Soil health – What should the doctor order? *Soil Use and Management*, 33, 339-345. <https://doi.org/10.1111/sum.12344>
- Wortmann C. S., Dobermann, A. R., Ferguson, R. B., Hergert, G. W., Shapiro, C. A., Tarkalson, D. D. y Walters, D. T. (2009). High-Yielding Corn Response to Applied Phosphorus, Potassium, and Sulfur in Nebraska. *Agronomy Journal*, 101,546–555. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0103x>
- Voss, R. D. (1993). Corn. En: Bennett, W.F. (1993). *Nutrient Deficiencies and Toxicities In Crop Plants*. 1st Edition. APS Press. Minnesota. USA.
- Zone, P. P., Culman, S. W., Haden, V. R., Lindsey, L. E., Fulford, A. y Zhao, K. (2020). Do soil test levels and fertilization with phosphorus and potassium impact field crop tissue concentrations? *Agronomy Journal*, 112, 3024–3036. <https://doi.org/10.1002/agj2.20243>
- Zubillaga, M. M. y Conti, M. E. (1996). Availability of exchangeable and non-exchangeable K in Argentine soils with different mineralogy. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 159(2)149-153. <https://doi.org/10.1002/jpln.1996.35815.90208>