

# Capítulo 7

## Nutrición del cultivo

Fernando García  
Adrián Correndo  
Nahuel Reussi Calvo  
Juan Pablo Monzon  
Ignacio Ciampitti  
Fernando Salvagiotti

---

## 7. Nutrición del cultivo

**Fernando García, Adrián Correndo, Nahuel Reussi Calvo, Juan Pablo Monzon, Ignacio Ciampitti y Fernando Salvagiotti**

La producción de maíz depende de la capacidad del cultivo de capturar los recursos ambientales (radiación, agua, nutrientes) que determinan el crecimiento y el rendimiento. El conocimiento de los requerimientos nutricionales y la dinámica de acumulación, y del rol de los distintos nutrientes en la determinación del rendimiento es clave no solo para alcanzar una producción alta y sostenible, sino también para mejorar la eficiencia de utilización de los recursos e insumos involucrados en el sistema productivo.

En este capítulo se presentan aspectos generales de la fertilidad de suelos y manejo de la fertilización en las principales regiones maiceras del mundo, los aspectos ecofisiológicos relacionados con los requerimientos y la dinámica de absorción de nutrientes, los efectos de la nutrición en el desarrollo, crecimiento, y rendimiento en biomasa y granos, los principios científicos detrás del diagnóstico y manejo responsable de la fertilización de maíz, como así también la interacción del manejo de la nutrición con otras prácticas de manejo del cultivo.

### 7.1. Fertilidad de suelos y manejo de la fertilización en las principales regiones maiceras del mundo

En las distintas regiones productoras de maíz alrededor del mundo (Capítulo 1) existen limitaciones edáficas que afectan la producción del cultivo, consecuencia de la presencia de compactaciones sub-superficiales, acidez/alcalinidad, salinización, y la disponibilidad de nutrientes. Los nutrientes que más frecuentemente limitan la producción de maíz en las principales regiones productoras del mundo son nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), azufre (S) y zinc (Zn). En zonas templadas (Argentina, EE. UU., Unión Europea, Norte de China), las limitantes nutricionales están asociadas con el uso intensivo del suelo, la erosión y la pérdida de materia orgánica. Las zonas tropicales se caracterizan, además, por la presencia de suelos ácidos (Brasil, regiones tropicales de América Latina, SE Asia), debido a niveles naturalmente altos (tóxicos) de aluminio (Al) junto con una disponibilidad muy baja de macronutrientes como P, calcio (Ca) y/o magnesio (Mg).

La nutrición balanceada en maíz es clave para lograr altos rendimientos y su impacto es evidente en ensayos de larga duración, con respuestas a la fertilización balanceada del orden del 20% al 70% (Tabla 7.1). Si bien la disponibilidad de agua y la variabilidad en la ocurrencia de los eventos climáticos explican gran parte de las brechas entre los rendimientos actuales y los alcanzables de maíz, en la mayoría

de las regiones maiceras la correcta nutrición puede cerrar sustancialmente las brechas de rendimiento (Mueller et al., 2012; Majumdar et al., 2016).

Los desafíos del manejo de la nutrición del cultivo tienen diferentes alcances y complejidades debido a la gran variabilidad en los agroecosistemas, y requieren de soluciones específicas para los distintos sitios (Majumdar et al., 2016). En regiones del Sur de Asia, las deficiencias de N y P y los desbalances con otros nutrientes como K son frecuentes. En África subsahariana, la aplicación de nutrientes escasa y desequilibrada es la causa de la baja fertilidad de los suelos y sigue siendo el factor más importante que contribuye a la baja productividad. En cambio, en China las aplicaciones de N suelen ser excesivas y desbalanceadas con respecto a otros nutrientes (Tabla 7.2). En el cinturón maicero norteamericano, aun cuando las eficiencias de uso de nutrientes han mejorado en los últimos años, las aplicaciones de fertilizantes siguen siendo excesivas en algunos sistemas de producción. En Latinoamérica, en Chile y Uruguay se aplican dosis altas de N y P, mientras que en Argentina, Bolivia y Paraguay las dosis aplicadas son bajas para los rendimientos posibles de alcanzar. En Brasil, la aplicación de NPK es más equilibrada, y la adición de enmiendas cálcico-magnésicas (cales) son importantes para sostener la producción en suelos ácidos.

En Argentina, el rendimiento potencial de maíz en secano (RP Sec, Figura 7.1) es de  $11,6 \text{ t ha}^{-1}$  (Aramburu Merlos et al., 2015). Si consideramos que es económicamente viable lograr un 80% de ese RP Sec, la Argentina podría aspirar a alcanzar  $9,3 \text{ t ha}^{-1}$  de rendimiento promedio a nivel país, mientras que el rendimiento actual ronda las  $7 \text{ t ha}^{-1}$ . Las brechas de rendimiento, diferencia en el rendimiento actual y el RP Sec, son del 41% a nivel de país, y varían del 26% al 69% a través de las diferentes regiones productoras (Figura 7.1). Las zonas del país que presentan las mayores brechas son las que usan las menores dosis de nutrientes, destacando el rol de los mismos para poder cerrar las brechas de rendimiento. Las dosis actuales de N, P y S no son suficientes para cubrir los requerimientos del cultivo e indican minado de nutrientes del suelo (García y González Sanjuan, 2016; Puntel et al., 2019). Para lograr cerrar las brechas de rendimiento y mantener la calidad del recurso suelo sería necesario triplicar, duplicar y sextuplicar las dosis actuales de N, P y S, respectivamente.

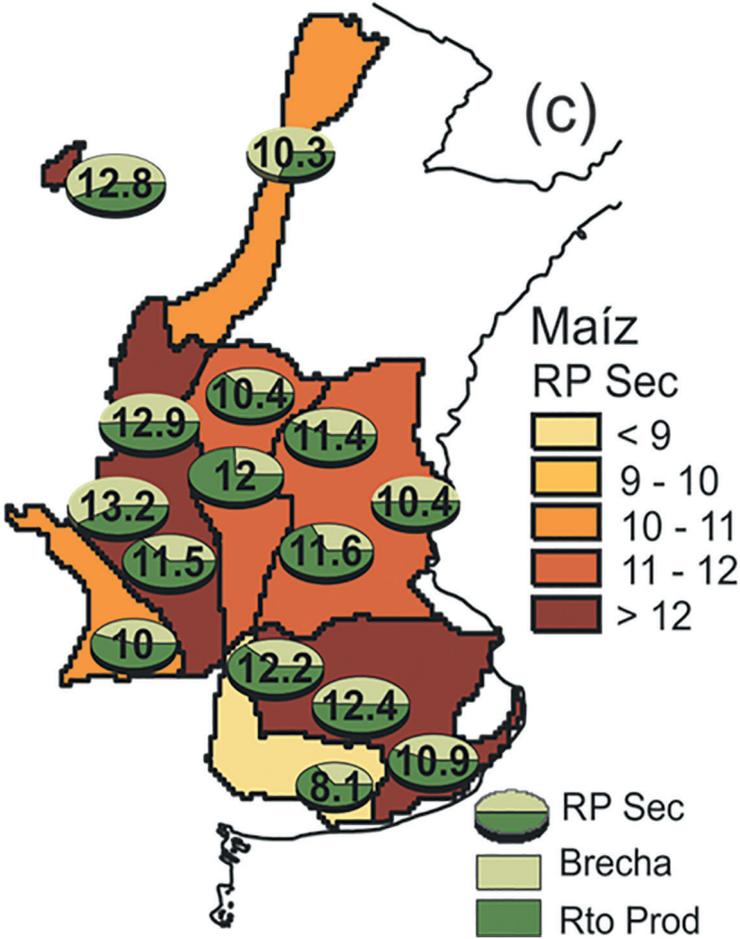


Figura 7.1: Rendimiento potencial de maíz en seco (RP Sec, t ha<sup>-1</sup>) a nivel de zona climática (áreas coloreadas) y de estación meteorológicas de referencia (círculos, el tamaño es proporcional al nivel de RP Sec). En cada círculo se muestra el rendimiento actual (color oscuro) y la brecha de rendimiento (color claro) en forma relativa al RP Sec (en números). Para más detalles ver Aramburu Merlos et al. (2015).

Tabla 7.1: Impacto de la nutrición balanceada en maíz en ensayos de larga duración.

Pais	Fuente	Tratamiento	Rendimiento (kg/ha)	Comentarios
Argentina	Red Nutrición CREA Sur Santa Fe	Control sin fertilizar	6947	Promedios de 41 sitios/año, 2000 a 2020
		NPS	11663	
	Red Nutrición CREA Norte Córdoba	Control sin fertilizar	7963	Promedios de 41 sitios/año, 2014 a 2020
		NPS	9519	
Bolivia	Exploratorios CREA Santa Cruz Este	Control sin fertilizar	4196	Promedios de 11 sitios/año, 2012 a 2019
		NPKS	5571	
Canadá	Gregorich y Drury (1996)	Control sin fertilizar	672 (maíz continuo) - 3640 (rotación)	Ensayos de Largo Plazo (1959), Ontario. Promedios 1989 a 1993
		NPK	5824 (maíz continuo)- 8120 (rotación)	
China	Wang et al. (2010)	Control sin fertilizar	3100	Promedios de 15 años en la Planicie Norte de China
		NPK	6300	
India	Majumdar et al. (2016)	Recomendación del estado (RE)	4200	Promedios de 296 (RE), 482 (MP) y 510 (RNE) observaciones
		Manejo del productor (MP)	7800	
		Recomendación de Nutrient Expert (RNE)	8400	

Tabla 7.2: Aplicación promedio y estimaciones de balances y productividad parcial de los nutrientes nitrógeno y fósforo en maíz en distintos países. Datos y estimaciones elaboradas a partir de RETAA-BCBA y Fertilizar AC (Argentina); FAOStat, IFASat; IPNI Brasil; y FUBC-IFA (Heffer et al., 2017).

País	Año o periodo	Rendimiento kg/ha	Aplicación			Balance <sup>1</sup>			Productividad Parcial <sup>2</sup>		
			N	P	K	N	P	K	N	P	K
			----- kg nutriente/ha -----			-----			kg grano/kg nutriente aplicado		
<b>Argentina</b>	2016 a 2018 (3 años)	6980	59	12	0.2	-30	-6	-24	118	582	34900
<b>Bolivia</b>	2018	2728	13	4	5	-22	-3	-4	207	682	546
<b>Brasil</b>	2013-16 (4 años)	5068	79	16	32	14	3	15	64	317	157
<b>Chile</b>	2014/15	10102	213	77	68	84	50	34	47	132	148
<b>Paraguay</b>	2018	4995	35	18	13	-29	5	-5	143	285	400
<b>Uruguay</b>	2018	6536	142	29	25	58	12	3	46	225	261
<b>China</b>	2018-20	6246	112	19	17	32	3	-4	56	329	367
<b>EE.UU.</b>	2018-20	10793	169	27	52	31	-1	15	64	400	208

1 Balance= Nutriente aplicado – Nutriente removido en grano; <sup>2</sup> Productividad parcial= Rendimiento / Nutriente aplicado

## 7.2. Requerimientos y dinámica de absorción de nutrientes

Los requerimientos nutricionales de maíz han variado a través de los años a partir de la liberación de materiales genéticos con mayor potencial de rendimiento. Esto ha tenido como consecuencia cambios en las tasas de absorción de los nutrientes (Bender et al., 2013; Ciampitti y Vyn, 2014 a, b) ya que el nivel de rendimiento de grano es el factor principal que define el contenido de nutrientes y el índice de cosecha, i.e. la proporción del nutriente en el grano respecto del total absorbido por el cultivo (Ciampitti y Vyn, 2014a, b).

La Tabla 7.3 muestra requerimientos de nutrientes en maíz en base a estudios recientes, siendo N y K los nutrientes con mayores requerimientos, seguidos por P, Mg, Ca y S. La información de la Tabla 7.3 es orientativa y útil para hacer comparaciones. Sin embargo, en condiciones de producción, las necesidades de nutriente por kg de rendimiento no son constantes, sino que presentan variaciones según las condiciones de crecimiento del cultivo. En la Figura 7.2 se muestra la curva que relaciona el rendimiento con la absorción de N, P y K. Para un determinado nivel de absorción de nutriente, el cultivo puede alcanzar un rango de rendimientos posibles dentro de dos límites: (i) un límite inferior, de máxima concentración del nutriente, en donde se observa la menor eficiencia en el uso del mismo y (ii) un límite superior, de máxima dilución, donde la eficiencia en el uso del nutriente es máxima. Cuando el cultivo está produciendo sobre el límite superior, para aumentar el rendimiento es necesaria una mayor absorción del nutriente, por ejemplo, a través del aporte de fertilizantes que aumenten la disponibilidad de este en el suelo. En la Figura 7.2, también se observa que, a altos niveles de absorción de los nutrientes, los incrementos en el rendimiento no son proporcionales, siendo el potencial de producción el que determina la eficiencia de uso del nutriente.

Entre los micronutrientes, se destaca el requerimiento de hierro (Fe), seguido por zinc (Zn) y manganeso (Mn). Entre los macronutrientes, los índices de cosecha de P y N son los más altos (> 65%), mientras que los índices de cosecha de micronutrientes en general son bajos; solamente el Zn se ubica por arriba del 50%.

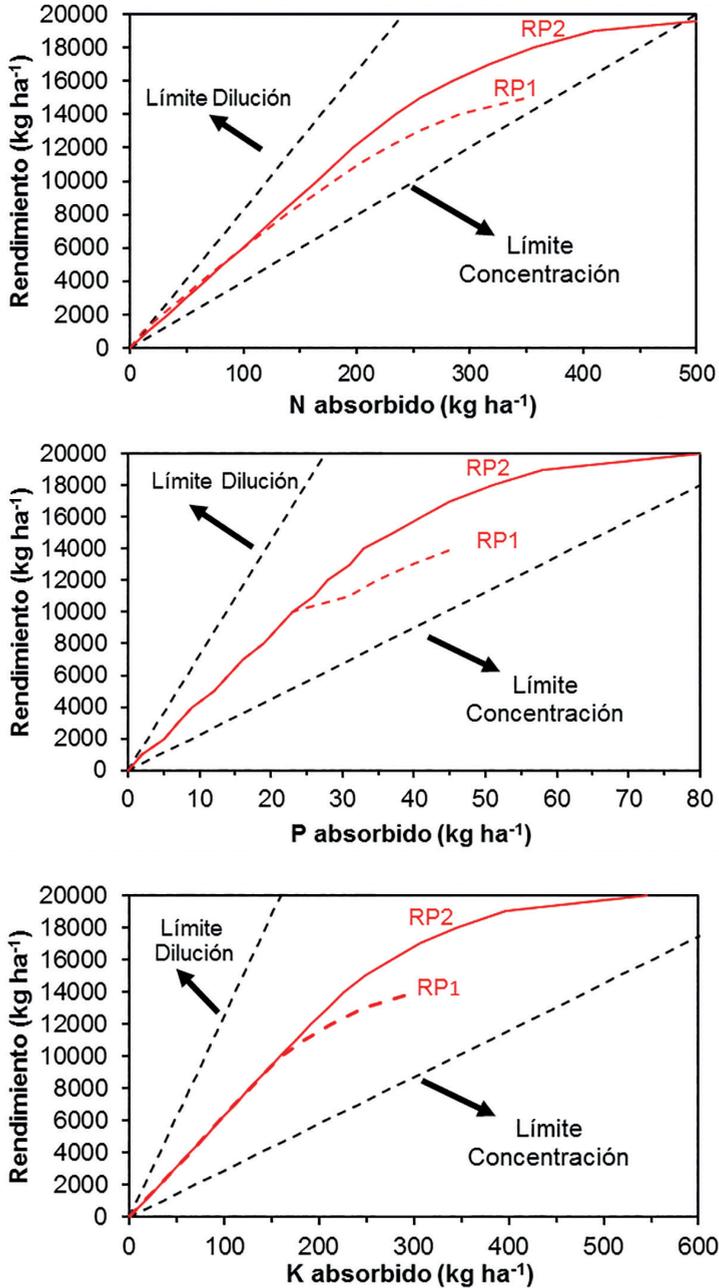


Figura 7.2: Relación de la absorción total de N, P y K con el rendimiento de maíz. La línea punteada inferior y superior son los límites de concentración y dilución del nutriente, respectivamente. RP1 y RP2 corresponden a dos niveles de potencial de rendimiento. Adaptado de Setiyono et al (2010).

Tabla 7.3: Requerimientos, índice de cosecha y remoción en grano de nutrientes en maíz.

Nutriente	Requerimiento	Índice de cosecha	Remoción en grano	Referencia
	kg/Mg	%	kg/Mg	
Nitrógeno	16.9-23.8	54-67	9.1-13.8	Bender et al., 2013
				Setiyono et al., 2010
				Ciampitti et al., 2013
				Xu et al., 2013
Fosforo	2.7-4.5	69-85	2.3-3.7	Bender et al., 2013
				Setiyono et al., 2010
				Ciampitti et al., 2013
				Xu et al., 2013
Potasio	14.0-20.4	17-33	3.5-4.9	Bender et al., 2013
				Setiyono et al., 2010
				Ciampitti et al., 2013
				Xu et al., 2013
Calcio	2.9	5	0.1	Ciampitti y Vyn, 2013
Magnesio	3.4-4.9	29-45	1.4-1.5	Bender et al., 2013
				Ciampitti y Vyn, 2013
Azufre	1.7-2.2	55-61	1.0-1.3	Bender et al., 2013
				Ciampitti y Vyn, 2013
				Pagani et al., 2012
	g/Mg	%	g/Mg	
Boro	6.9	23	1.6	Bender et al., 2013
Cobre	8.0-11.8	29-32	3.4-2.6	Bender et al., 2013
				Ciampitti y Vyn, 2013
Hierro	114.7-193.4	17-18	20.7-32.0	Bender et al., 2013
				Ciampitti y Vyn, 2013
Manganeso	45.2-49.6	13-14	6.0-6.8	Bender et al., 2013
Zinc	41.5-54.6	52-62	25.7-28.5	Bender et al., 2013
				Ciampitti y Vyn, 2013

### 7.2.1. Nitrógeno

La disponibilidad de N es fundamental ya que más del 75% del N foliar está asociado con las enzimas y pigmentos responsables de la fotosíntesis (Kumar et al., 2002). Para rendimientos de maíz de ca. 12000 kg ha<sup>-1</sup>, Bender et al. (2013) observaron que el N acumulado promedio fue de hasta 286 kg N ha<sup>-1</sup>, con tasas máximas de acumulación entre 2,7 y 3,7 kg N ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> (Bender et al., 2013) entre V5 y R4-R5 y picos de ca. 9 kg N ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> ligeramente antes de la floración. La cantidad de N acumulado hasta floración varió entre 52% y 78% y entre 57% y 70% del N total en la cosecha en estudios reportados antes y después de 1990, respectivamente (Ciampitti y Vyn, 2012), destacándose la creciente importancia de la absorción post-floración en híbridos modernos (Mueller y Vyn, 2016) (Figura 7.3).

La dinámica de acumulación y removilización de N en la planta se refleja en el índice de cosecha de N (ICN, N en grano / N en parte aérea), que varía entre 0,54 y 0,67 (Tabla 7.3) según la relación fuente-destino y el híbrido (Uhart y Andrade, 1995; Ciampitti et al., 2013).

### 7.2.2. Fósforo y otros nutrientes

Si bien los requerimientos de P son claves en los estadios iniciales del cultivo para alcanzar altos rendimientos, este nutriente comienza a acumularse en las plantas a un ritmo máximo después de V5-V6. En floración, el cultivo ha acumulado entre el 45% y el 55% (Bender et al., 2013) del P total a cosecha (Figura 7.3). El índice de cosecha P oscila entre el 69% y el 85% (Tabla 7.3).

La dinámica de acumulación de K en el cultivo se anticipa en comparación con N y P (Figura 7.3). Casi toda la absorción de K generalmente se completa con la floración, y puede haber una disminución parcial del valor acumulado entre floración y madurez fisiológica debido a pérdidas de materia seca relacionadas con hojas senescentes y panoja. El índice de cosecha de K varía entre el 17% y el 33% (Tabla 7.3), por lo que la mayoría del nutriente absorbido regresa al suelo con los residuos de los cultivos.

La tasa de acumulación relativa de S es intermedia entre la acumulación de N y la de materia seca (Pagani et al., 2012; Carciochi et al., 2020). La concentración y acumulación de S está fuertemente asociada con la de N, pero el índice de cosecha es menor (Carciochi et al., 2020).

Los micronutrientes, en general (salvo el cloro), tienen escasa movilidad en la planta, por lo que se removilizan en pequeña medida desde las partes vegetativas a los granos en crecimiento. Una parte importante de lo absorbido vuelve al suelo con los rastrojos, con excepción del Zn.

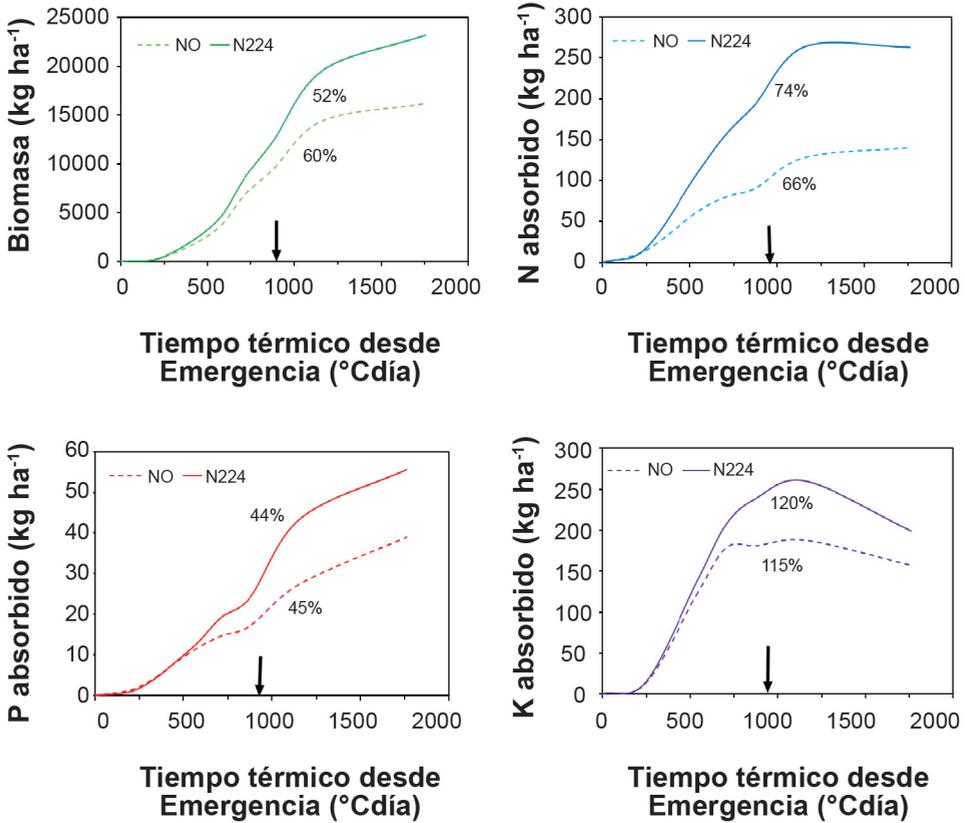


Figura 7.3: Evolución desde la emergencia del cultivo hasta la madurez de (A) Biomasa total aérea y su contenido de (B) Nitrógeno, (C) Fósforo y (D) Potasio de cultivos de maíz con una densidad de 79000 plantas ha<sup>-1</sup> y dos dosis de N (N0: sin N añadido; N224: 224 kg N ha<sup>-1</sup>). La flecha indica la fecha media de anthesis y el porcentaje al lado de cada línea es el valor en anthesis con respecto a la cantidad total a madurez. Adaptado de Ciampitti et al. (2013).

### 7.3. Efectos de la nutrición en el desarrollo, crecimiento y rendimiento en biomasa y granos

#### 7.3.1. Desarrollo

En condiciones de campo, las deficiencias de distintos nutrientes no alteran procesos del desarrollo tales como la aparición de los primordios de hojas y del ápice reproductivo. En ese sentido se ha observado que, ante deficiencias de N, P o K, el número final de hojas no es alterado (Tabla 7.4). Sin embargo, existen evidencias que muestran que las deficiencias de P retrasan la aparición de las estructuras re-

productivas por un retraso en la tasa de aparición de hojas (filocrono). Plenet et al. (2000) observaron que el aumento del filocrono en un 20% ante una deficiencia de P fue de mayor magnitud entre V4 y V9, con retrasos en la ocurrencia de R1 entre 2 a 4 días. Colomb et al. (2000) detectaron que el aumento del filocrono ante deficiencias de P era de mayor magnitud en hojas más basales. Ante deficiencias de N, Uhart y Andrade (1995) observaron leves incrementos en el filocrono. Retrasos en la ocurrencia de R1 también fueron observados con dichas deficiencias debidos a caídas en la tasa de desarrollo de las flores que demoraron la aparición de estigmas, incrementando el intervalo entre floración masculina y femenina (Rossini et al., 2012; D'Andrea et al., 2009).

### 7.3.2. Crecimiento y generación del número de granos

La máxima producción alcanzable del cultivo de maíz en un ambiente particular se logra siempre que los nutrientes no limiten la actividad del aparato fotosintético durante el periodo crítico de determinación del número de granos. Esta actividad es determinada por el desarrollo del área foliar (que determina la intercepción de la radiación del canopeo,  $e_i$ ) y la eficiencia del aparato fotosintético para asimilar el dióxido de carbono. Los efectos relativos de las deficiencias nutricionales sobre los componentes ecofisiológicos de la producción de biomasa y generación del rendimiento son distintos de acuerdo con el nutriente y el grado de deficiencia del mismo.

En general, estudios realizados en maíz han mostrado que con deficiencias tanto sea de N, P, K o S, las mayores reducciones se observan en el área foliar (Tabla 7.4). Como fue expresado anteriormente, estas diferencias están dadas principalmente por una reducción en la tasa de expansión foliar y/o una aceleración en la senescencia de las hojas. Esto resulta en una menor intercepción de la radiación incidente que, junto con caídas en la eficiencia de uso de la radiación interceptada ( $ec$ ), reducen la tasa de crecimiento del cultivo (Capítulo 3). Si dicha reducción ocurre en el periodo crítico de la determinación del número de granos alrededor de R1, se afecta el rendimiento del cultivo (Andrade et al., 2002) (Capítulo 4). Uhart y Andrade (1995) observaron en distintos experimentos que deficiencias de N, que redujeron el rendimiento, se asociaron con reducciones del área foliar máxima, disminuciones en la intercepción máxima de radiación en R1 y caídas en la  $ec$  (Figura 7.4).

Tabla 7.4: Efectos de la fertilización con distintos nutrientes sobre componentes ecofisiológicos determinantes del rendimiento en cultivos de maíz.

Nutriente	Nivel deficiencia	Reducción relativa x déficit del nutriente (%)							Fuente	
		Filocrono <sup>1</sup>	NFH <sup>2</sup>	AF <sup>3</sup>	IR <sup>4</sup>	Radiación Interceptada	ec <sup>5</sup>	Rendimiento		IC <sup>6</sup>
N	2 experimentos	6	0	25	7		18	24	---	Uhart y Andrade (1995)
	3 años	-	0	28	15	24	24		5	D'Andrea et al. (2009)
P	2 años	P-Bray	0	20	7	8	15	25	1	Arias Usandivaras et al. (2018)
		6 ppm	0	20	7	8	15	25	1	
			0	20	7	8	15	25	1	
P	19 sitios	P-Bray	-	-	2	4 <sup>x</sup>	6	10	-1	Salvagiotti et al. (2017)
		4-13 ppm	-	-	2	4 <sup>x</sup>	6	10	-1	
K	2 años	P-Olsen	23	11	3	9 <sup>xx</sup>	5	12	1	Plenet et al (2000)
		23 ppm (arenoso)	23	11	3	9 <sup>xx</sup>	5	12	1	
K	2 años	K-int	2	10	6	6	9	20	0	Arias Usandivaras et al. (2018)
		47 ppm	2	10	6	6	9	20	0	
S	19 sitios	S-SO <sub>4</sub>	-	-	0	0	13	7	1	Salvagiotti et al. (2017)
		5-16 ppm	-	-	0	0	13	7	1	

<sup>1</sup> En el caso del filocrono se indica el % de aumento en el mismo por deficiencia de los nutrientes; <sup>2</sup> NFH= Número final de hojas; <sup>3</sup> AF = Máxima Área foliar; <sup>4</sup> IR= Máximo porcentaje de intercepción de radiación; <sup>5</sup> ec = Eficiencia de conversión de la radiación; <sup>6</sup> Índice de cosecha.

<sup>x</sup> Periodo crítico; <sup>xx</sup> Todo el ciclo.

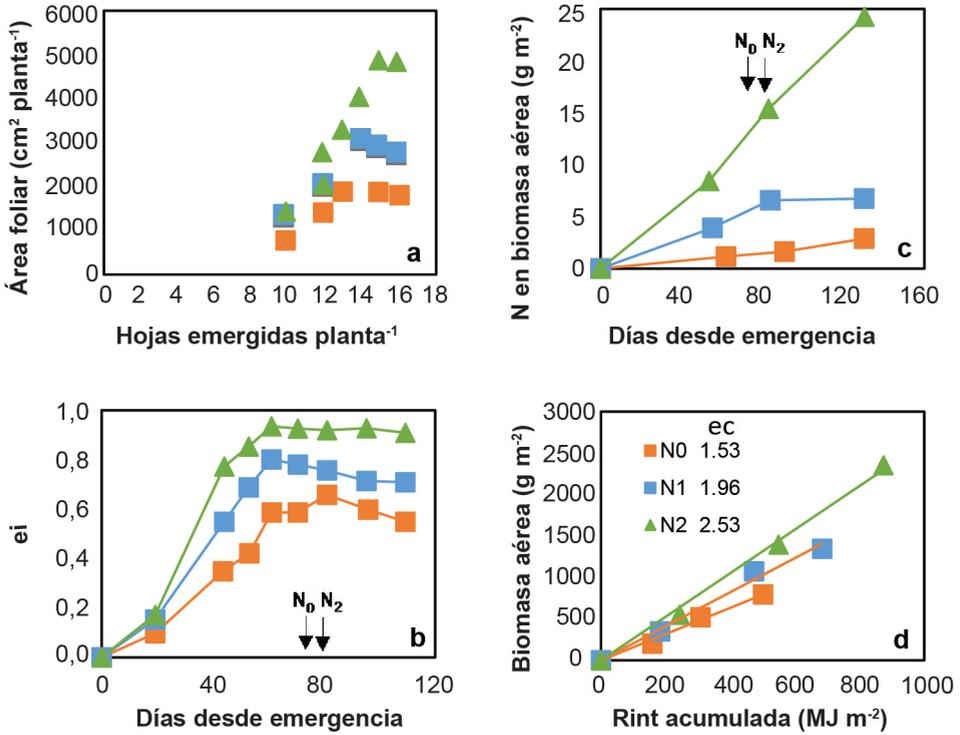


Figura 7.4: Efectos de la disponibilidad de N sobre a) el área foliar por planta, b) la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo (ei), c) el N acumulado en la biomasa y d) la relación entre biomasa acumulada y la radiación fotosintéticamente activa interceptada (Rint) acumulada. La pendiente de las líneas en d) representa la ec para cada tratamiento. N2 es el control sin deficiencia y N1 y N0 representan estrés moderado y severo, respectivamente. Las flechas verticales en b) y c) indican la floración femenina en N0 y N2. Adaptado de Uhart y Andrade (1995).

Además de la reducción en el área foliar máxima que se observa cuando el cultivo tiene deficiencias de N, P o K, la tasa de generación del área foliar se retarda ante estas deficiencias, por lo que se retrasa la cobertura del entresurco afectando la captura de radiación y la capacidad de competir con las malezas. Arias Usandivaras et al. (2018), en suelos con contenidos de P Bray menores a 5 ppm y K intercambiable menores a 50 ppm, observaron incrementos en el rendimiento del 33% en respuesta a la fertilización con P, con incrementos en el área foliar, la interceptación de radiación y la ec. Los efectos de la deficiencia de K sobre los mismos procesos fueron de menor magnitud en términos relativos. Por otra parte, Salvagiotti et al. (2017) observaron incrementos en el rendimiento y el número de granos, acompañados por un aumento en la tasa de crecimiento del cultivo y de la ec durante el

periodo crítico de la determinación del número de granos en suelos con deficiencias en P y S. Estos autores observaron que la adición de P tuvo mayor impacto en la intercepción de radiación previo a R1, indicando la importancia de este nutriente en la velocidad de crecimiento del canopeo. En el mismo trabajo se observó que la respuesta a la fertilización con S fue de menor intensidad, con incrementos menores en la tasa de crecimiento en el periodo crítico y la ec (Tabla 7.4). En consonancia con estas observaciones, Colomb et al. (2000) observaron que el área individual de las hojas se redujo ante deficiencias de P, principalmente por una reducción en la tasa de expansión en todas las posiciones.

En general, las deficiencias de P, K o S (cuando el N es provisto en cantidades adecuadas) afectan en mayor medida los procesos de crecimiento que determinan la producción de biomasa que la partición hacia los granos, ya que distintos estudios muestran que el índice de cosecha no es afectado (Tabla 7.4).

Diversos estudios han mostrado que, cuando el N no es limitante, los efectos de las interacciones P\*K o P\*S sobre el rendimiento y otras variables asociadas son sinérgicos, ya que la respuesta a la adición combinada de los dos nutrientes fue mayor que la suma de los efectos individuales.

Entre los micronutrientes, el Zn tiene numerosas funciones en la planta: síntesis de proteínas, regulación de genes, estructura e integridad de membranas, protección de células de daños oxidativos. La deficiencia de Zn reduce la fotosíntesis y la acumulación de materia seca afectando la intercepción de radiación y la ec. La aplicación de Zn en condiciones de deficiencia mejora la viabilidad del polen e incrementa el número y peso de granos especialmente en la zona apical de la espiga (Liu et al., 2020).

En resumen, las deficiencias nutricionales afectan los procesos del crecimiento y cuando esto ocurre alrededor del periodo crítico de floración, reducen el número de granos, principal componente del rendimiento (Andrade et al., 2002; D'Andrea et al., 2009; Salvagiotti et al., 2017).

### 7.3.3. Llenado de granos

Durante la etapa del llenado de granos en maíz, el principal destino de los fotoasimilados y nutrientes son los granos (Capítulo 5), por lo que cobran importancia dos procesos: la absorción actual del nutriente y la removilización desde estructuras vegetativas a los granos en crecimiento. Esta removilización tiene como consecuencia la aceleración de la senescencia del área foliar. Diversos estudios han mostrado como las deficiencias de N aceleran el proceso de senescencia. El N se acumula en las partes vegetativas hasta 10-15 d después de la floración y luego se removiliza parcialmente a los granos. Los factores que reducen la fuente fotosintética durante el llenado de granos (por ejemplo, baja radiación incidente, sequía, defoliación, etc.) reducen la absorción de N, lo que resulta en mayor removilización de N, y pueden disminuir la concentración del nutriente del grano (Uhart y Andrade, 1995; Borrás et

al., 2002). Durante el llenado del grano, la removilización de N puede representar entre el 18 y el 42% del N en la biomasa vegetativa a los 15 días después de la floración (Uhart y Andrade, 1995). La contribución al N de los granos de la removilización durante el llenado puede oscilar entre el 15% y el 70%, con variaciones entre híbridos (Ciampitti y Vyn, 2014b; Mueller y Vyn, 2016; Ta y Weiland, 1992; Uhart y Andrade, 1995).

Ante deficiencia de P, la reducción en el área foliar verde por efecto de la senescencia después de R1 ha mostrado tener un efecto relativo menor que la reducción en el área foliar por efecto del atraso en la aparición de hojas antes de R1 (Plenet et al., 2000). Arias Usandivaras et al. (2018) observaron que la deficiencia de P disminuye la expansión foliar previo a R1 con poco efecto sobre la senescencia, mientras que la deficiencia de K tuvo un efecto relativamente mayor sobre la senescencia posterior a R1.

Una correcta nutrición del cultivo afecta la calidad del grano, ya que la disponibilidad de nutrientes afecta la acumulación de proteínas y la calidad de las mismas (Capítulo 15). Cirilo et al. (2011) mostraron que aplicaciones de N y S en R1 incrementaron la biomasa post-R1, el número de granos (más cuaje), el peso individual del grano y la calidad del grano *Flint*. En este sentido, Ferraguti y Salvagiotti (2014) observaron que maíces de tipo *Flint* tienen un requerimiento de S mayor que maíces amarillos, asociado con el contenido de proteínas con mayor cantidad de aminoácidos azufrados en el primer caso. Así, el genotipo *Flint* necesitó 24 kg de N y 1,5 kg de S para producir 1 tonelada de rendimiento, mientras que el genotipo amarillo tuvo un requerimiento de 18 kg de N y 1 kg de S para producir el mismo rendimiento.

#### 7.4. Principios científicos para el manejo responsable de la fertilización de maíz

En un contexto de producción agropecuaria cada vez más demandante para un manejo eficiente de la nutrición de los cultivos que contemple la mejora en la producción con el cuidado del ambiente, el diagnóstico correcto del estado nutricional de los cultivos es condición necesaria para mejorar la eficiencia y efectividad de utilización de los recursos e insumos involucrados en el sistema productivo. Así, el concepto central de los “4 Requisitos del Manejo Responsable de Nutrientes” (4Rs) implica realizar, para cada situación específica, un diagnóstico nutricional que permita la recomendación de la “fuente” correcta de nutrientes (¿Qué?), en la “dosis” correcta (¿Cuánto?), en el “momento” correcto (¿Cuándo?), y en la “forma” correcta (¿Cómo?) (IPNI, 2013). Los cuatro “Requisitos” (4Rs) se basan en principios específicos basados en evidencia científica (Tabla 7.5). En términos generales, los principios son comunes a todos los sistemas, pero la forma en que se ponen en práctica a nivel local varía en función de las condiciones específicas de suelo, cultivo, meteorológicas, económicas y sociales.

Tabla 7.5: Ejemplos de principios científicos y prácticas asociadas al manejo de nutrientes en el cultivo de maíz. Adaptado del Manual 4R de la Nutrición de Plantas (IPNI, 2013).

	FUENTE	DOSIS	MOMENTO	FORMA
<b>PRINCIPIOS CIENTÍFICOS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Abastecimiento balanceado de nutrientes esenciales</li> <li>» Relación costo y oferta de nutrientes</li> <li>» Adaptación a las propiedades del suelo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Evaluación de la oferta de nutrientes del suelo y otras fuentes</li> <li>» Evaluación de la demanda del cultivo</li> <li>» Evaluación de las relaciones de precios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Dinámicas de absorción del cultivo y de abastecimiento del suelo</li> <li>» Determinación de los momentos de mayor riesgo de pérdidas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Patrones de distribución de raíces</li> <li>» Variabilidad espacial</li> <li>» Riesgos de pérdidas</li> <li>» Efectividad y uniformidad de aplicación</li> </ul>
<b>ELECCIÓN DE PRÁCTICAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Fertilizantes sólidos o líquidos, mezclas físicas o químicas</li> <li>» Reciclados dentro del establecimiento</li> <li>» Productos protectores</li> <li>» Abonos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Análisis del suelo</li> <li>» Recomendación de la dosis óptima agronómica</li> <li>» Balancear la remoción del cultivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Previo a la siembra</li> <li>» A la siembra</li> <li>» Aplicaciones divididas en el ciclo del cultivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Al voleo</li> <li>» Incorporado</li> <li>» En bandas</li> <li>» Chorroado, inyectado</li> <li>» Foliar</li> <li>» Con la semilla</li> <li>» Dosis variable</li> </ul>

## 7.5. Diagnóstico y manejo de fertilidad de suelos y nutrición del cultivo

El suelo es la principal fuente de nutrientes para las plantas y su oferta se estima usualmente a través del análisis de las formas “disponibles” o “extractables” de los nutrientes. Tradicionalmente, el análisis de suelos ha sido el enfoque más utilizado para determinar necesidades de fertilización de los cultivos. La cantidad de nutriente que se extrae químicamente en un análisis representa la fracción más disponible del nutriente en el suelo y mantiene una relación con el nutriente absorbido y el rendimiento del cultivo. Por lo tanto, el análisis del suelo representa un “índice de disponibilidad” de nutrientes para el cultivo.

Más recientemente, se ha valorado en forma creciente la evaluación del estatus nutricional del cultivo, sea como un complemento y/o una alternativa al análisis de suelos (Withers et al., 2014; Lemaire et al., 2021), a través del análisis de plantas o de metodologías indirectas como los sensores locales o remotos.

Asimismo, los muestreos geo-referenciados diferenciando ambientes, el mayor conocimiento de los requerimientos de nutrientes, los modelos de simulación, el manejo de bases de datos complejas, y la capacidad de evaluar necesidades y respuestas a nivel de lote de producción (por ej., parcelas de omisión), aportan alternativas novedosas y superadoras para mejorar los diagnósticos de fertilidad del suelo y de estado nutricional del cultivo (IPNI, 2013).

### 7.5.1. Nitrógeno

El N es un nutriente de elevada movilidad en el sistema suelo-planta-atmósfera. Su principal reserva en el suelo es la materia orgánica (MO), pero el maíz y otros cultivos lo absorben en formas inorgánicas de nitrato y amonio que son mineralizadas desde la MO por la acción de microorganismos y regulada principalmente por la temperatura y la humedad. Las formas inorgánicas de N (mineralizado o proveniente de fertilizantes y abonos) están sujetas a pérdidas por lixiviación, desnitrificación y volatilización. Estas pérdidas reducen la eficiencia en el uso del N aplicado resultando en menor productividad y disminución del retorno económico y generando impactos ambientales negativos por contaminación de suelos, aguas y/o aire. Si bien la eficiencia de uso del N aplicado varía según suelos, condiciones meteorológicas y manejo, las estimaciones globales indican que aproximadamente la mitad del N aplicado en tierras de cultivo se convierte en productos cosechables (Ladha et al., 2005; Lassaleta et al., 2014), mientras que el resto es susceptible a ser liberado al medio ambiente (Herrera et al., 2016; McLellan et al., 2018; Tamagno et al., 2022). Por tanto, el manejo eficiente del N del suelo (recurso) y del N aplicado (insumo) es central a los aspectos productivos, económicos y ambientales de la producción de maíz a nivel global.

## Diagnóstico

Dada la movilidad del N en el sistema suelo-planta, el diagnóstico es gobernado por la demanda del cultivo, la cual se relaciona directamente con el nivel de producción del cultivo de maíz. Las distintas estrategias/herramientas para recomendar aplicaciones de N en maíz, basadas en la disponibilidad de N en el suelo, presentan una alta variabilidad en la predicción de dosis óptimas sea por factores de suelo, de clima y/o de manejo (Morris et al., 2018; Puntel et al., 2019; Correndo et al., 2021). Sin embargo, el empleo de estas estrategias aporta al mayor conocimiento local y contribuye al manejo más eficiente y efectivo de N en cada lote o ambiente. A las estrategias de oferta de N del suelo, se suman evaluaciones del estatus nitrogenado del cultivo que permiten corregir o complementar la aplicación de nutrientes durante el ciclo del cultivo (Lemaire et al., 2021). En las siguientes secciones se presentan y discuten brevemente las principales metodologías/herramientas de diagnóstico de fertilidad y nutrición nitrogenada del cultivo.

## Balances de N

La metodología de balances de N para el diagnóstico de necesidades de fertilización está basada en la evaluación de la oferta del sistema y la demanda según rendimiento del cultivo (Meisinger, 1984; Morris et al., 2018) (Figura 7.5). Este método, y sus versiones simplificadas, se han utilizado ampliamente en el diagnóstico de N para maíz a partir de la siguiente ecuación:

$$N \text{ cultivo} = N \text{ inicial} - N \text{ final} + N \text{ mineralizado} + N \text{ rastrojo} + N \text{ fertilizante} - N \text{ perdido}$$

[Ecuación 7.1]

donde N cultivo es el N absorbido, N inicial = N del suelo mineral en la siembra, N final = N del suelo mineral a madurez, N mineralizado = N mineralizado durante el ciclo del cultivo, N rastrojo = N suministrado por el rastrojo, N fertilizante = N aplicado como fertilizante, N perdido = N perdido del sistema por volatilización, lavado, desnitrificación u otras vías.

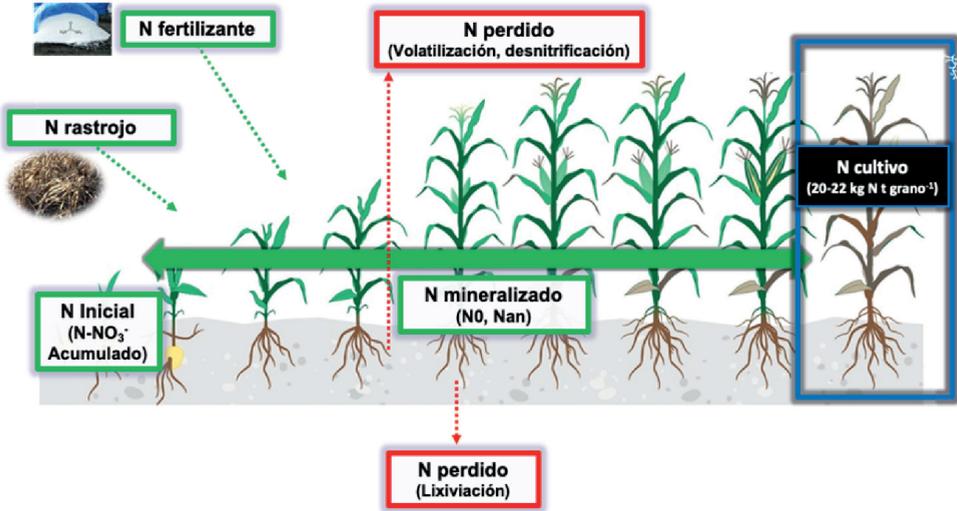


Figura 7.5: Componentes del balance de N en un cultivo de maíz.

La recomendación de fertilización nitrogenada que surge de la Ecuación 7.1 es:

$$N \text{ fertilizante} = N \text{ cultivo} - N \text{ inicial} - N \text{ mineralizado} - N \text{ rastrojo} + N \text{ perdido} \text{ [Ecuación 7.2]}$$

El N cultivo depende del rendimiento objetivo y los requerimientos de N para producir grano. El cultivo de maíz absorbe 17-24 kg de N por t de grano (Tabla 7.3), variando según la eficiencia interna o fisiológica del N (EFN, producción de grano por unidad de N absorbido por el cultivo), la cual depende de la disponibilidad de N del suelo, las condiciones climáticas y el material genético.

El N inicial se puede determinar por análisis de N-nitrato en pre-siembra y depende del tipo de suelo, el manejo previo y las condiciones de temperatura y humedad. El N mineralizado durante el ciclo depende de la cantidad y composición de la MO del suelo, la temperatura del suelo y la disponibilidad de agua (Reussi Calvo et al., 2018). El N rastrojo depende del volumen de rastrojo sin descomponer, la relación C/N de los residuos de cultivos previos, y las variaciones de temperatura y humedad del suelo (Ranells y Wagger, 1996).

Las pérdidas de N incluyen lixiviación, desnitrificación y volatilización. Las pérdidas de N por volatilización son de significancia cuando se aplica urea sobre la superficie y dependen principalmente de la presencia y volumen de rastrojo, la temperatura y la humedad del suelo, las mismas pueden ser de hasta un 50% del N aplicado (Silva et al., 2017). La desnitrificación ocurre en anaerobiosis, alta disponibilidad de C y presencia de bacterias desnitrificadoras, con pérdidas de N variables entre 0 a 6,9% (Palma et al., 1997; Sainz Rozas et al., 2001; Kim et al., 2021). Las pérdidas por lixiviación dependen de la disponibilidad de N-nitrato en el perfil de suelo y la ocurrencia de lluvias que generen drenaje en profundidad, lejos del al-

cance de las raíces. Todas estas pérdidas son altamente variables al depender de condiciones climáticas, de manejo y de suelo.

Dada la dificultad de estimar los parámetros de la Ecuación 7.2, frecuentemente, la misma se simplifica, por ej. considerando nulas las pérdidas de N del sistema, o que los aportes de N de los rastrojos son neutros, o considerando el valor de N final nulo. La versión más simplificada del uso del balance de N para realizar recomendaciones de fertilización es el uso de análisis de suelo en pre-siembra que se discute en el siguiente apartado.

### Análisis de suelo

La metodología de diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz más extendida en la región maicera de Argentina se basa en el contenido de N-nitrato del suelo en el momento de la siembra (0-60 cm) más el N agregado con la fertilización (Ns+f). Correndo et al. (2021) reportaron umbrales críticos de Ns+f dependiendo del rendimiento objetivo: 133, 176, 222, 251 y 303 kg N ha<sup>-1</sup> para rendimientos de grano de 6509, 8943, 10647, 12014 y 14127 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 7.6). Independientemente de la textura de suelo, el umbral crítico de Ns+f aumenta a una tasa de aproximadamente 22 kg Ns+f por t de incremento en el rendimiento objetivo. La textura afecta la tasa de respuesta a niveles de Ns+f hasta el umbral crítico, pero no modifica el mismo.

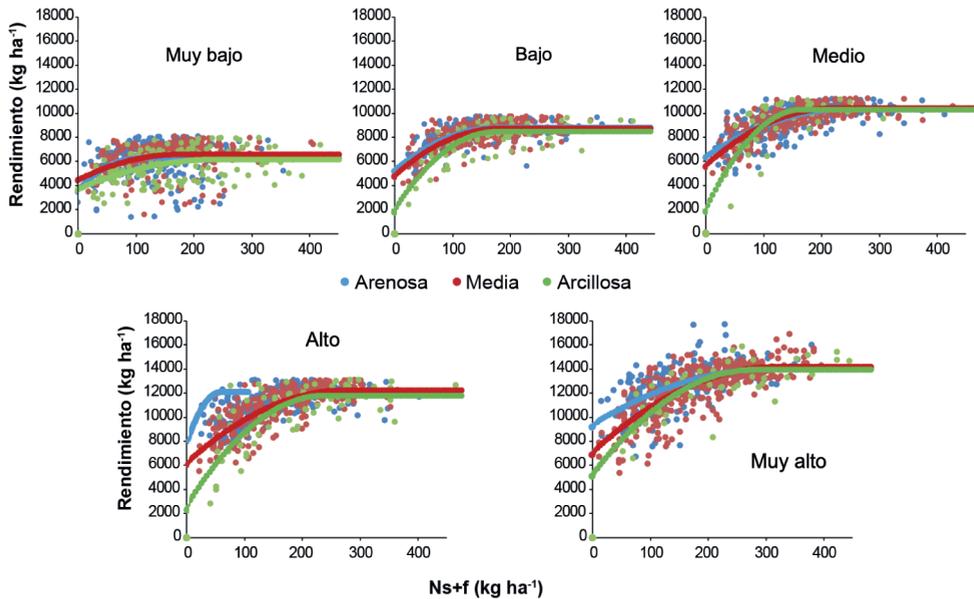


Figura 7.6: Respuesta de rendimiento de maíz a la disponibilidad de nitrógeno medida como suelo más fertilizante (Ns+f) según nivel de rendimiento alcanzable (Muy Bajo a Muy Alto) y textura del suelo (Arcillosa, Media, Arenosa). Adaptado de Correndo et al. (2021).

Complementariamente, se ha propuesto determinar la oferta de N del suelo en estados más avanzados que permitiría estimar la capacidad de mineralización de N orgánico del suelo a través del análisis de suelo a 0-30 cm al estado de seis hojas (Magdoff et al., 1984; Binford et al., 1992; Pagani et al., 2008; Sainz Rozas et al., 2008). En la región pampeana argentina se han indicado niveles críticos de 20 a 25 mg kg<sup>-1</sup> de N-nitrato para alcanzar rendimientos relativos al máximo de 90-95%.

Una debilidad común de la mayoría de los estudios basados en el análisis de N-nitrato es la gran incertidumbre de los modelos ( $R^2 \leq 0.50$ ), con umbrales de N fuertemente modificados por el potencial de rendimiento, la mineralización de N del suelo y el aporte de N del cultivo anterior (Orcellet et al., 2017; Carciochi et al., 2021). El uso de indicadores de mineralización del N, como el N mineralizado anaeróbicamente (Nan), una incubación aeróbica corta o una extracción química pueden contribuir a mejorar la performance del análisis de N-NO<sub>3</sub> a la siembra (Orcellet et al., 2017; Reussi Calvo et al., 2018; McDaniel et al., 2020), aunque su contribución ha sido marginal en algunas regiones de EE.UU. (Clark et al., 2020). Para diferentes zonas maiceras de Argentina se estimó que la incorporación del Nan a los modelos de diagnóstico tradicional (Ns+f) redujo la incertidumbre hasta en un 46% (Orcellet et al., 2017). Este aporte de N por mineralización puede estimarse a través del rendimiento del maíz sin N, junto con información de la textura del suelo, precipitaciones y temperatura (Reussi Calvo et al., 2018).

### Estado nitrogenado del cultivo

El estatus nitrogenado del cultivo se puede evaluar directamente a través de análisis de planta, o indirectamente mediante el uso de sensores locales o remotos. Los análisis de planta, u órganos de la misma, se basan en la determinación de niveles críticos o rangos de suficiencia para un estado fenológico y órgano establecido. Las calibraciones de niveles críticos o rangos de suficiencia consideran como tal a la concentración mínima del nutriente con la que se logra 90-95% del rendimiento máximo. El criterio de rangos de suficiencia es el más popular y se pretende que los valores foliares no sean inferiores a un nivel considerado como crítico o se sitúen dentro de un rango de suficiencia (Tabla 7.6).

Tabla 7.6: Rangos de suficiencia de nutrientes en planta para maíz (Correndo y García, 2012; Mallarino y Sawyer, 2018).

Nutriente	Momento de muestreo	
	V4-V6 <sup>#</sup>	R1 <sup>##</sup>
N (%)	3,0-5,0	2,7-4,0
P (%)	0,48-0,58	0,25-0,32
K (%)	2,5-3,8	1,4-2,0
S (%)	0,15-0,4	0,10-0,60
Ca (%)	0,25-1,6	0,20-1,00
Mg (%)	0,3-0,8	0,15-1,00
B (ppm)	5-25	4-25
Cu (ppm)	5-25	5-25
Fe (ppm)	30-300	11-300
Mn (ppm)	20-160	15-200
Mo (ppm)	0,1-2,0	0,15-0,20
Zn (ppm)	20-50	15-100

# Planta entera; ## Hoja inferior de la espiga.

Las curvas de dilución independizan la concentración del nutriente del estado fenológico del cultivo, permitiendo determinar la concentración de N para maximizar el crecimiento y la biomasa (Gastal et al., 2015) (Figura 7.7). Un índice de nutrición nitrogenada (INN) se define entonces como la relación entre la concentración de N observada y la concentración crítica que maximiza la producción de biomasa (Ciam-pitti et al., 2021). Analizando las curvas de dilución de N para diferentes híbridos, densidades y regiones del mundo, se obtuvieron valores variables de INN desde 0,5 hasta 0,86 entre V5 y R1 que se asociaron con reducciones del rendimiento máximo (Ziadi et al., 2008; Nasielski y Deen, 2019; Maltese et al., 2020). Trabajos recientes han confirmado la posibilidad de extender durante el periodo de post-antesis el concepto de curva de dilución para el diagnóstico de N en maíz (Zhao et al., 2020).

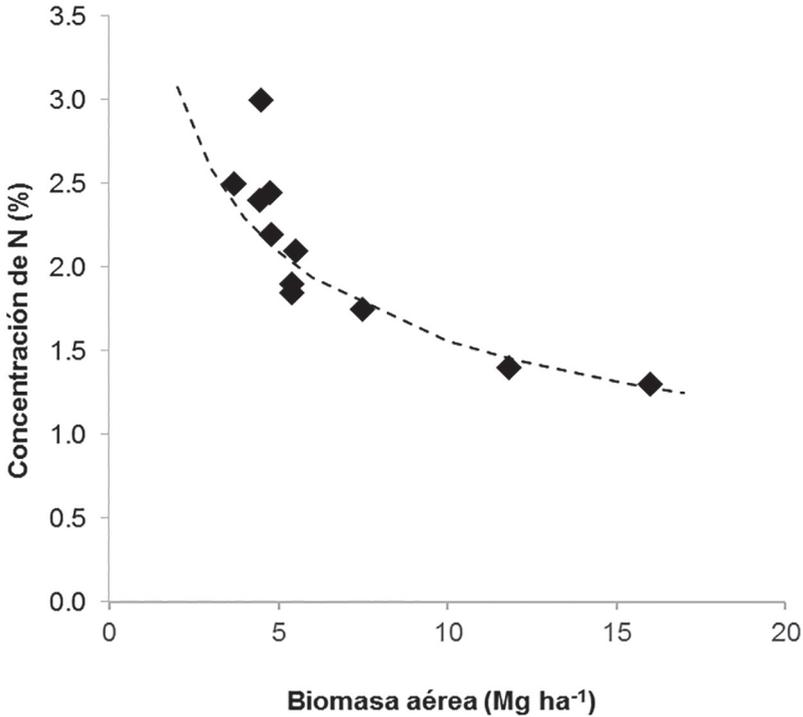


Figura 7.7: Concentración de nitrógeno (N) en biomasa aérea en función de la materia seca acumulada en el cultivo de maíz (adaptado de Uhart y Andrade, 1996).

La concentración de N-nitrato en pseudotallos también se ha utilizado como indicador del estatus nitrogenado de la planta con valores críticos de referencia de 11 a 16 g N-NO<sub>3</sub> kg<sup>-1</sup> a 30 días después de la emergencia para obtener el 95% del rendimiento máximo de grano (Iversen et al., 1985); 4,3 a 10,4 g N-NO<sub>3</sub> kg<sup>-1</sup> en V6 (Sainz Rozas et al., 2001); y 0,4 g N-NO<sub>3</sub> kg<sup>-1</sup> en R6 (Blackmer et al., 1997; Echeverría et al., 2001). Estos umbrales necesitan una calibración local para ser utilizados en recomendaciones de fertilización en otros ambientes.

La concentración N en el grano a cosecha indica cómo fue el manejo de la nutrición del cultivo. Valores por debajo de 1,1-1,2% N reflejan pérdidas de rendimiento en grano de maíz (Barbieri et al., 2013; Carciochi et al., 2021). Al igual que para planta, el INN en grano ha sido propuesto como una alternativa promisoría para el monitoreo de N a cosecha, con valores umbrales de 0,95 para maíces creciendo sobre diferentes antecesores (Carciochi et al., 2021).

El uso de sensores locales y remotos para estimar el estatus nitrogenado del cultivo se ha extendido fuertemente en los últimos años. Asimismo, el uso de cartas de

colores de hoja (Nguy-Robertson et al., 2015) ha permitido expandir esta herramienta entre agricultores de menores recursos, por ej., en Asia (Singh y Singh, 2021).

Los sensores locales como el SPAD 502 permiten diagnosticar déficits o excesos de fertilización nitrogenada respecto de la dosis óptima económica entre V6 y V10 (Sainz Rozas et al., 2019). Los híbridos pueden diferir sustancialmente en las lecturas de SPAD incluso cuando se exponen a un suministro similar de N del suelo. La precisión de la predicción se puede mejorar utilizando el índice de suficiencia de N (ISN) estimado como el valor del SPAD en el lote respecto del valor de SPAD en una franja no limitada por N. La sensibilidad de este método es suficientemente alta después de V6 (Sainz Rosas et al., 2019) (Figura 7.8).

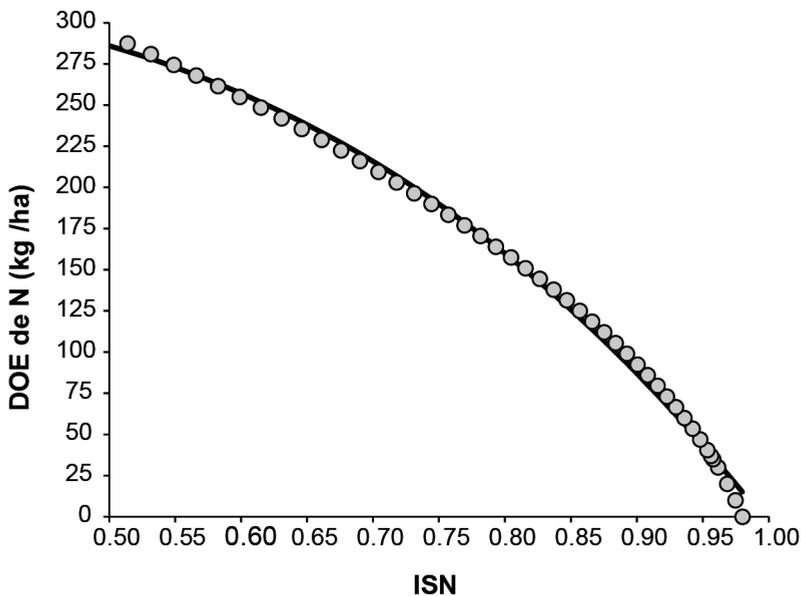


Figura 7.8: Dosis óptima económica de aplicación de N (DOE) según el índice de suficiencia de N (ISN, lectura SPAD del lote/lectura SPAD franja sin limitación de N) en el estadio V10 (Adaptado de Sainz Rosas et al., 2019).

El manejo variable basado en sensores remotos e imágenes puede ser una alternativa complementaria para mejorar la eficiencia de uso de N en modelos de producción de alta tecnología (Melchiori, 2010; Zhang et al., 2020). Numerosos antecedentes reportan la posibilidad de detectar deficiencias de N en los cultivos a partir de métodos basados en el uso de sensores remotos que miden la reflectancia del canopy (Scharf et al., 2002; Shanahan et al., 2008; Melchiori, 2012; Singh y Singh, 2021). Los resultados de las experiencias en maíz conducidas hasta el presente han permitido validar procedimientos, verificar relaciones y obtener modelos predic-

tivos del rendimiento. Asimismo, estudios recientes han reportado respuestas a la fertilización nitrogenada en estados avanzados, por lo cual el monitoreo del estado nitrogenado del cultivo a lo largo del ciclo permitiría corregir deficiencias según la condición de lote o ambiente y mejorar de la eficiencia de uso del nutriente en maíz (Fernández et al., 2020).

### Modelos de respuesta utilizando variables ambientales y de suelo

En el cinturón maicero norteamericano, los servicios de extensión de siete universidades han propuesto un calculador de dosis de N para maíz (MRTN según sus siglas en inglés) que estima la dosis óptima económica según zona, rotación y precios de N y maíz a partir de la base regional de datos de funciones de respuesta a N en maíz (<http://cnrc.agron.iastate.edu>, Sawyer et al., 2006).

Por otra parte, se han propuesto modelos de regresión múltiple que estiman la recomendación de fertilizante nitrogenado incluyendo variables de fácil determinación o estimación y constituyen un paso intermedio entre los modelos simplificados y los más complejos como pueden ser los modelos de simulación. A modo de ejemplo, Puntel et al. (2019) proponen un modelo de determinación de dosis óptima económica de N para Argentina a partir de cuatro variables consideradas dinámicas (número de días con precipitaciones mayores de 20 mm, cantidad de residuos, disponibilidad de N-nitrato a la siembra y estrés térmico en floración) y una variable estática (profundidad de suelo). De manera similar, Ruiz et al. (2021) proponen modelos que incluyen disponibilidad de N-nitrato a la siembra, el cultivo previo, y la capacidad de abastecimiento aparente de N del suelo.

### Modelos de simulación

Los modelos de simulación constan de una matriz de modelos matemáticos que representa, de una manera simplificada, las relaciones entre partes de un sistema dado, y que son capaces de reproducir el funcionamiento del mismo. La base de su funcionamiento consiste en la combinación de diferentes condiciones climáticas, suelos, recarga de agua, manejo de cultivos, disponibilidad de N, etc. para simular el rendimiento de grano. Estos modelos de simulación, en general, incluyen subrutinas de dinámica de N en el sistema suelo-planta (Adapt-N, APSIM, CERES-Maize, Maize-N, WHCNS) y permiten explorar las restricciones de N en el rendimiento de los cultivos (Jones et al., 2003; Keating, 2003; Melkonian et al., 2008; Setiyono et al., 2011; Liang et al., 2016; Puntel et al., 2016).

En Argentina, se generó la plataforma “Maicero” que incluye diferentes escenarios de manejo del cultivo, tipo de suelo, recarga hídrica, registros climáticos, y disponibilidad de N, para simular el rendimiento y la respuesta a la fertilización nitrogenada utilizando el modelo CERES Maize para un gran número de localidades

en la región pampeana argentina (Satorre et al., 2006; Mercau, 2010; <https://www.crea.org.ar/maicero/>).

### Manejo de la fertilización nitrogenada

Las decisiones de manejo de la fertilización nitrogenada que faciliten la sincronización del momento de aplicación de N con los periodos de mayor demanda de N del cultivo se reflejarán en un uso más eficiente del N aplicado redundando en mayor productividad y menor impacto ambiental (Sainz Rozas et al., 2004; Pagani et al., 2008; Ciampitti y Vyn, 2012; Mueller et al., 2017). Las aplicaciones durante el desarrollo del cultivo, especialmente a partir de V6 cuando la demanda de N se incrementa, son frecuentemente recomendadas (Scharf et al., 2002, Sainz Rozas et al., 2004; Lü et al., 2012), aunque no siempre mejoran la EUN (Ruiz et al., 2021). El momento de aplicación interactúa significativamente con la fuente de N utilizada, el método de aplicación y la ocurrencia de lluvias, cuando se analiza la eficiencia de uso del N aplicado.

Las fuentes de N disponibles son numerosas entre los fertilizantes minerales y los abonos orgánicos. Las formas de N de los fertilizantes inorgánicos son generalmente disponibles como nitrato o amonio, o rápidamente convertibles en estas formas en el caso de urea. Los abonos orgánicos, como efluentes de tambo, cama de pollo y otros, incluyen formas orgánicas e inorgánicas de N. En el caso de las orgánicas, deben transformarse a nitrato o amonio para ser absorbidas por las raíces. La sincronía entre la aplicación y la absorción de N se puede facilitar utilizando fertilizantes de liberación lenta, que retrasan la liberación del nutriente para que coincida con momentos de mayor demanda del cultivo.

Al aplicar fertilizantes u abonos nitrogenados, el método de aplicación debe considerar las posibles pérdidas por volatilización de amoníaco a partir de formas amoniacales, en especial urea aplicada superficialmente. Los inhibidores de ureasa reducen las pérdidas por volatilización de amoníaco y mejoran la eficiencia de uso del N aplicado en superficie sin incorporación especialmente con siembra directa (Jantalia et al., 2012; Liu et al., 2019). Los inhibidores de la nitrificación y de la ureasa pueden reducir las pérdidas vía emisión de  $N_2O$  o lixiviación de  $NO_3^-$  (Burzaco et al., 2014; Eagle et al., 2017).

### 7.5.2. Fósforo

El P presenta baja movilidad en el suelo. Las plantas lo absorben en forma de ortofosfato cuya concentración en solución es baja y llega a las raíces fundamentalmente por difusión. Los iones ortofosfato en solución provienen de la mineralización de P en la fracción orgánica, de la desorción de P de coloides arcillo-húmicos y de la solubilización de minerales fosfatados.

Por su baja concentración en solución, el P no presenta pérdidas significativas como el N. Sin embargo, los procesos de retención-fijación de P pueden ser significativos, dependiendo de la cantidad y tipo de arcillas, óxidos de Fe y Al, compuestos de calcio y cenizas volcánicas. Suelos rojos tropicales, volcánicos y calcáreos son los de mayor fijación de P. La eficiencia de uso del P aplicado variará entonces en función de las características de los suelos. En suelos con baja capacidad de fijación (por ej., suelos templados de pradera), la eficiencia es mayor y puede llegar al 25% en un cultivo (García et al., 2014). En estos suelos, el P aplicado que queda retenido se va liberando a lo largo de los años recuperándose hasta un 90% en el término de 3-6 años (Sucunza et al., 2018).

### Diagnóstico

Por su dinámica en suelos, el diagnóstico de P se basa principalmente en la oferta, generalmente caracterizada a partir del análisis en pre-siembra, en el cual se determina el nivel de P extractable en la capa superficial del suelo (0-10, 0-15 o 0-20 cm). Los extractantes utilizados varían en las distintas regiones del mundo dependiendo del tipo de suelo: Bray 1, Mehlich 1, Mehlich 3, Olsen, resinas de intercambio. Los umbrales críticos por debajo de los cuales la respuesta a la fertilización fosfatada en maíz es probable son de 10-18 mg kg<sup>-1</sup> para Bray 1 o Mehlich 3 y de 6-10 mg kg<sup>-1</sup> para Olsen (Leikam et al., 2003; Cadot et al., 2018; Correndo, 2018) (Figura 7.9). En Argentina, las calibraciones disponibles se han realizado, históricamente, utilizando P Bray-1 a la profundidad de 0-20 cm (Correndo, 2018). Por otra parte, los umbrales podrían verse afectados por la textura del suelo, los suelos de textura fina tienen un umbral de P más bajo que los suelos de textura gruesa (Correndo, 2018). La evaluación de fracciones orgánicas lábiles de P del suelo puede mejorar las recomendaciones de fertilización (Appelhans et al., 2021).

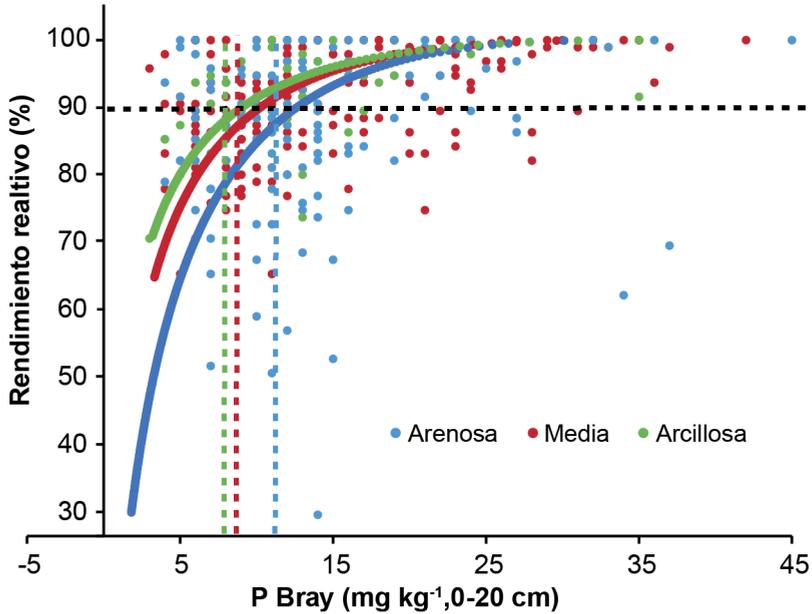


Figura 7.9: Rendimiento relativo de maíz (testigo respecto del máximo) en función del nivel de P extractable (Bray-1, 0-20 cm) según textura del suelo; arcillosa (verde), media (rojo), y arenosa (azul.) Los niveles críticos estimados para alcanzar el 90% del rendimiento relativo, indicados por las líneas verticales punteadas, son de 9, 10, y 12 ppm para texturas arcillosa, media, y arenosa, respectivamente. Fuente: Adaptado de Correndo et al. (2018).

Una vez conocido el nivel de P Bray del suelo, el criterio de fertilización para P puede definirse como de “suficiencia”, priorizando el cultivo inmediato, o de “construcción y mantenimiento”, priorizando el recurso suelo. La decisión por uno u otro criterio, a partir del conocimiento agronómico, es empresarial y depende de factores tales como la tenencia de la tierra (propietario, arrendatario), disponibilidad de capital, etc. En cualquier caso, el conocimiento de las correlaciones, calibraciones y la interpretación del análisis de suelo contribuirá a una toma de decisión más adecuada para optimizar la eficiencia de uso del nutriente y de otros recursos.

#### Manejo de la fertilización fosfatada

Dada la demanda temprana de P del cultivo, es conveniente que el P se aplique de manera que esté disponible desde etapas iniciales del cultivo. En cuanto a la forma de aplicación, las aplicaciones en bandas son las que presentan mayor eficiencia de uso, pero las aplicaciones al voleo anticipadas unos 45-60 días a la siembra han mostrado eficiencias de uso similares si la dosis de aplicación de fertilizante

fosfatado es alta (superior a los 20 kg/ha de P) y/o el nivel de P Bray no es muy bajo (superior a 8 mg/kg) en suelos de baja retención de P (Bordoli y Mallarino, 1998; Barbagelata, 2011). En suelos de mayor retención, o fijadores de P como los rojos u oxisoles, la aplicación en bandas presenta una mayor eficiencia de uso (Prado et al., 2001).

Las fuentes fosfatadas incluyen fertilizantes solubles como los fosfatos diamónico y monoamónico y los superfosfatos simple y triple, todos ellos presentan similar eficiencia de uso por kg de P aplicado diferenciándose fundamentalmente por el contenido de otros nutrientes. Asimismo, en numerosas regiones se utilizan rocas fosfóricas o parcialmente tratadas (fosforitas). Los reciclados como estiércol bovino, efluentes de tambos, cama de pollo y otros son fuentes de valor para aportar P al sistema.

### 7.5.3. Potasio

La dinámica del K en los suelos está asociada con las fracciones minerales del suelo. La planta absorbe este nutriente como ion  $K^+$  desde la solución del suelo, en la cual se encuentra en bajas concentraciones, pero en equilibrio dinámico con la fracción de K intercambiable adsorbido a los coloides arcillo-húmicos. La fracción denominada no intercambiable reabastece al equilibrio K solución-K intercambiable y constituye la principal reserva.

Al igual que para el P, la baja concentración en solución y su abastecimiento a las raíces por difusión, caracteriza al K como un elemento de baja movilidad, por lo cual el diagnóstico de fertilidad potásica se basa en la oferta del suelo, es decir en el análisis de la fracción intercambiable del suelo. El umbral para la deficiencia de K intercambiable (extracción con acetato de amonio 1N) para maíz y otros cultivos, varía entre 100 y 180 mg  $kg^{-1}$  según regiones y sistemas de producción (Barbazán et al., 2011; Mallarino et al., 2013). Estas calibraciones de K intercambiable y el rendimiento, o la respuesta, del cultivo son variables y suelen estar afectadas por la textura, la mineralogía, la presencia de capas compactadas y la humedad del suelo, entre otros factores (Bell et al., 2021). El K tiene una interacción negativa con Ca y Mg ( $Ca + Mg / K < 20$ ), por lo que, en algunas situaciones, se consideran también estas relaciones para el diagnóstico de necesidades de fertilización.

El K se aplica en general en pre-siembra a siembra de maíz, aunque en suelos de menor capacidad de intercambio catiónico (suelos arenosos, suelos oxisoles) se recomienda la aplicación demorada hasta V6. El cloruro de K (ClK) es el fertilizante potásico más utilizado, y también se utilizan sulfato de K, nitrato de K y sulfato de K y Mg. El K en fuentes orgánicas como estiércoles y barros cloacales se presenta generalmente como K soluble. La forma de aplicación puede ser en bandas o al voleo. La aplicación en bandas debe considerar la dosis y la cercanía de la semilla ya que el fertilizante potásico más utilizado es el ClK, el cual presenta elevada fitotoxicidad en contacto con la semilla. Las aplicaciones superficiales en cobertura son

frecuentemente utilizadas, aunque varios autores han destacado que las aplicaciones en bandas profundas pueden presentar mayor eficiencia de captura (Bordoli y Mallarino, 1998; Vyn y Janovicek, 2001).

#### 7.5.4. Azufre

La dinámica de S en el sistema suelo-planta es similar a la del N, ya que la reserva en los suelos está en un 95-99% bajo forma orgánica. Los cultivos lo absorben como  $\text{SO}_4^{2-}$  y llega a la raíz preferentemente por flujo masal. A diferencia de N, los procesos de pérdida por lixiviación son mucho menos significativos y las pérdidas en formas gaseosas son casi inexistentes.

Los ambientes más frecuentemente deficientes en S incluyen una o varias de las siguientes condiciones: suelos arenosos, bajos contenidos de materia orgánica; suelos degradados por erosión, con muchos años de agricultura continua, con historia de cultivos de alta producción que solo han recibido fertilización nitrogenada y fosfatada. En maíz, las dosis de S recomendadas varían, según el nivel de rendimiento esperado y la historia agrícola del lote, entre 5 y 20 kg S/ha. Generalmente, las respuestas se saturan por encima de los 10 kg S ha<sup>-1</sup> en regiones templadas (Salvagiotti et al., 2017), mientras que en ambientes subtropicales y tropicales las dosis deberían ser mayores (Pias et al., 2019). Es importante mencionar que la respuesta al agregado de S en maíz tiene una relación positiva con la respuesta a N (Aulakh y Malhi, 2004; Pagani et al., 2009; Carciocchi et al., 2020).

El análisis de S- $\text{SO}_4$  en suelo a la siembra se ha evaluado en diversas regiones, con umbrales de deficiencia para maíz entre 7 y 10 mg kg<sup>-1</sup> (0-20 cm) y de 40 kg S/ha (0-60 cm) (Carciocchi et al., 2016; Pias et al., 2019). Sin embargo, aun con niveles de S-sulfato por debajo de los niveles críticos se observa variabilidad en la respuesta, probablemente debido a variaciones en la mineralización de S durante el ciclo de crecimiento y/o la presencia de napas superficiales con elevada concentración de  $\text{SO}_4$ . Carciocchi et al. (2016) informaron que el N mineralizable determinado por incubación anaeróbica a corto plazo (Nan) está asociado con la mineralización de S y explica el 62% de la variación en la respuesta a la fertilización con S en el maíz. El umbral de Nan se estableció en 54 mg N kg<sup>-1</sup>.

El estado azufrado del cultivo ha sido evaluado a través de una curva de dilución que permite determinar un índice de nutrición azufrada cuyo valor crítico es de 0,79 al estado V6 (Carciocchi et al., 2019). Este índice de nutrición azufrada se relacionó con la concentración de S, y con los valores absolutos y relativos del medidor de clorofila de la última hoja expandida en estado V6, con niveles críticos de 2,0 g S kg<sup>-1</sup>, 47,5 unidades y 0,94, respectivamente.

En cuanto a la fuente, generalmente es un nutriente acompañante en fuentes fosfatadas sólidas y nitrogenadas sólidas y líquidas. Las fuentes con sulfato son de uso inmediato por el cultivo, mientras que el S elemental es de baja solubilidad y debe ser oxidado a sulfato para que las plantas lo puedan utilizar.

7.5.5. Zinc

El Zn se ha destacado como un nutriente de respuesta frecuente en el cultivo de maíz. Investigaciones realizadas en Argentina, Brasil y EE.UU. muestran respuestas significativas del orden del 5% al 10% en suelos deficientes en este nutriente (Melgar et al., 2001; Furlani et al., 2005; Ruffo et al., 2016; Barbieri et al., 2017).

Para el diagnóstico, el rango crítico de Zn de suelo extraído con DTPA para el maíz es de 0,8 a 1,2 mg kg<sup>-1</sup> (Barbieri et al., 2017) (Figura 7.10). Martínez Cuesta et al. (2020b) indican que la extracción con Mehlich 3 correlaciona significativamente con la extracción con DTPA, con niveles críticos de 1,97 y 1,02 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, para alcanzar el 97% del rendimiento máximo. Estos autores proponen utilizar un nivel crítico económico variable según los costos de fertilizante y el precio de maíz, con rangos de 0,98 – 2,79 mg kg<sup>-1</sup>, y 0,41 – 1,61 mg kg<sup>-1</sup>, para Mehlich 3 y DTPA, respectivamente.

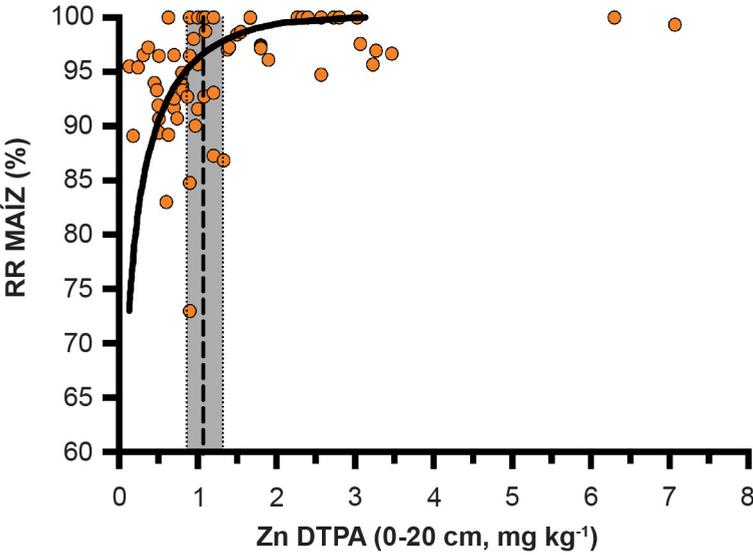


Figura 7.10: Rendimiento relativo de maíz (Rendimiento sin Zn/Rendimiento con Zn) en función del nivel de Zn extractable con DTPA (0-20 cm) en 64 experimentos en la región pampeana argentina. La línea vertical negra indica el nivel crítico de 1.1 mg kg<sup>-1</sup> y la zona grisada vertical el rango crítico de 0.9 a 1.3 mg kg<sup>-1</sup> (Adaptado de Barbieri et al., 2017).

En cuanto a la tecnología de fertilización, las respuestas se observan tanto con aplicaciones al suelo en mezclas sólidas químicas o físicas y con líquidos, tratamientos de semillas y foliares (Prystupa et al., 2012; Martínez Cuesta et al., 2020a). Las fuentes de Zn más utilizadas son los sulfatos, quelatos y oxisulfatos.

### 7.5.6. Otros nutrientes

El boro es un micronutriente frecuentemente deficiente en sistemas agrícolas cuya reserva en el suelo es principalmente la materia orgánica. Se han observado respuestas en maíz en numerosos países (Shorrocks, 1997; Melgar et al., 2001; Lordkaew et al., 2011; Kumar et al., 2018; Martínez Cuesta et al., 2018). El diagnóstico en suelo se realiza a través de extracciones con agua caliente u otros extractantes con niveles críticos variables entre 0,5 y 1 mg kg<sup>-1</sup>, y se han determinado niveles críticos de 10-15 mg kg<sup>-1</sup> en hojas (Kumar et al., 2018). Las dosis de aplicación al suelo son del orden de 1 kg ha<sup>-1</sup> y deben evitarse dosis altas por ser tóxicas (Shorrocks, 1997). El B suele aplicarse vía foliares en estados reproductivos dado su rol en desarrollo de flores y cuajado de frutos.

El cobre, el hierro y el manganeso suelen ser deficientes en suelos de pH alto, en condiciones de suelos calcáreos y/o de baja materia orgánica. En algunas regiones del mundo se han calibrado análisis de suelo para determinar condiciones de deficiencia con niveles críticos de 2,5-5 mg Fe kg<sup>-1</sup> y 1-5 mg Mn kg<sup>-1</sup> (extracción con DTPA) (Sims y Johnson, 1991). Los análisis de planta también son utilizados (Tabla 7.6). Las deficiencias de estos nutrientes generalmente se subsanan a través de aplicaciones foliares, tratamientos de semilla o incluyéndolos en mezclas químicas o físicas.

### 7.6. Interacción del manejo de la nutrición con otras prácticas de manejo

La nutrición del cultivo interactúa con otras prácticas de manejo como la fecha de siembra, la elección del cultivar, la densidad de plantas, el cultivo antecesor, la presencia de napa, y otras, involucrando tecnologías de conocimientos y procesos que pueden incrementar significativamente la eficiencia de uso de los nutrientes. El cultivo anterior puede modificar la respuesta del maíz al N y otros nutrientes a través de su dinámica nutricional. Esta situación se estima a través de un crédito o penalidad, que es el cambio de disponibilidad de N producido por el cultivo anterior. Morris et al. (2018) indicó un crédito de N de soja como cultivo anterior que osciló entre 22 y 50 kg de N ha<sup>-1</sup>. Este crédito o penalidad muchas veces se incluye en el diagnóstico de los requisitos de N. En el caso de cultivos de cobertura (CC) tipo gramínea (cebada, centeno, trigo), existe un componente de inmovilización de N que afecta la dosis de fertilización con N, mientras que el uso de un cultivo de leguminosas como la vicia vellosa (*Vicia villosa* Roth.) genera un aporte de unos 30 kg de N ha<sup>-1</sup> por tonelada de materia seca añadida al suelo (Salvagiotti et al., 2016; Salvagiotti, 2017; Carciochi et al., 2021). Dos prácticas de manejo de los CC afectan los procesos de mineralización-inmovilización: i) la elección de la especie vegetal y ii) el momento de terminación. Especies leguminosas como la vicia (*Vicia villosa* Roth.) mineralizan más del 60% del N en las primeras semanas, mientras que gramíneas como la avena (*Avena sativa* L.) inmovilizan N (Carciochi et al., 2021).

Situaciones intermedias se dan en consociaciones leguminosa-gramínea (Murungu et al., 2011; Poffenbarger et al., 2015; Sievers y Cook, 2018). Trabajos recientes han determinado que la terminación tardía de un CC de avena-vicia redujo el rendimiento del maíz en un 15% respecto a la terminación temprana. Los mayores efectos de coberturas de leguminosas como vicia dependerán de la biomasa y absorción/fijación de N que realice. En general, producciones de biomasa por encima de 5200 kg ha<sup>-1</sup>, que se corresponden con acumulaciones de 161 kg N ha<sup>-1</sup>, son suficientes para sostener la demanda de un cultivo de maíz de siembra tardía (Salvagiotti et al., 2021). En el caso de maíces de siembra temprana, para alcanzar similares valores de biomasa y aportes de N, la siembra de la leguminosa como cultivo de cobertura debe ser más temprana y la fecha de siembra del maíz retrasarse hasta mediados de octubre. Sin embargo, las decisiones de la terminación del cultivo de cobertura estarán gobernadas por la disponibilidad de agua en el suelo y las probabilidades de las precipitaciones durante el ciclo del cultivo.

La fecha de siembra puede afectar de manera diferencial las respuestas a N y otros nutrientes ya que variaran los máximos rendimientos alcanzables (es decir, la demanda) y la disponibilidad de nutrientes (Capítulo 12; Mercau y Otegui, 2014; Caviglia et al., 2014; Vitantonio-Mazzini et al., 2020). En las áreas semiáridas de Argentina, con mayor frecuencia de ocurrencia de eventos de estrés hídrico y golpes de calor, el retraso en la fecha de siembra además de estabilizar los rendimientos se asocia con una mayor oferta de N de la mineralización de materia orgánica (Maddoni, 2012).

La profundidad de la napa freática es otro factor que puede interactuar con la respuesta a la fertilización con N y fecha de siembra. Una mayor disponibilidad de agua cuando el nivel freático fluctúa dentro de los rangos óptimos (1,4 a 2,45 m de profundidad; Nosetto et al., 2009) contribuye a lograr rendimientos elevados y más estables (Rizzo et al., 2018). Sin embargo, estudios locales mostraron que napas poco profundas pueden tener efectos negativos en los rendimientos de maíz frente a altos niveles de precipitaciones (Vitantonio-Mazzini et al., 2020). Trabajos realizados en ambientes con influencia de napa, mostraron una respuesta promedio de 4544 kg ha<sup>-1</sup> (42% en términos relativos) a la fertilización con N en maíces tempranos (Ruiz et al., 2021), la cual se ubica por encima del 75% de las respuestas previas logradas en Región Pampeana.

En un sentido más amplio, la respuesta a la fertilización varía en función de la disponibilidad de agua para el cultivo (Capítulo 8). La respuesta del maíz a la fertilización con N aumentó con la disponibilidad de agua, medida como la evapotranspiración acumulada durante el ciclo del cultivo (Hernández et al., 2015) debido a una mayor demanda del nutriente por parte del cultivo. En ensayos de largo plazo en la región pampeana central de Argentina, el agregado de N mejoró la eficiencia de uso de agua, principalmente, en años secos (Manenti et al., 2020).

La elección de la densidad de plantas depende de las características del híbrido y la disponibilidad de recursos. El aumento en el suministro de N aumenta la densidad óptima de plantas sin estrés hídrico (Capítulo 9). Para un ambiente dado existe

una densidad óptima (Hernández et al., 2014; Sarlangue et al., 2007), a la que se debe suministrar una cantidad óptima de nutrientes. Las densidades de plantas más altas aumentan la absorción de N previo a la floración y la EUN, aumentando tanto la eficiencia de recuperación de N como la eficiencia fisiológica (Ciampitti y Vyn, 2012). La reducción en el espaciamiento entre surcos (Capítulo 10) puede mejorar la eficiencia de recuperación de N en niveles medios y bajos de oferta de N (Barbieri et al., 2008).

La elección del híbrido modifica la eficiencia del uso de N y los patrones de acumulación y removilización de N (Bender et al., 2013; D'Andrea et al., 2009). Cirilo et al. (2009) reportaron diferencias en los rasgos morfofisiológicos asociados con los genotipos de mayor rendimiento según la disponibilidad de N en varias localidades de la principal región productora de maíz de Argentina.

Los mecanismos naturales de resistencia a las enfermedades pueden mejorarse mediante una nutrición vegetal equilibrada. Por ejemplo, la deficiencia de K reduce la capacidad de la planta para resistir la entrada y la infección por organismos patógenos fúngicos, bacterianos y virales (Liu et al., 2007).

Finalmente, un número importante de productos biológicos se ha convertido en un segmento disruptivo del mercado orientado a la nutrición, que está aumentando exponencialmente e incluye tanto tratamientos foliares como de semillas. Existen tratamientos comerciales asociados con la mejora de la disponibilidad y absorción de nutrientes (N, P, Zn, y otros), tolerancia al estrés biótico y abiótico, regulación del crecimiento y rendimiento de grano (Zeffa et al., 2018; Mitter et al., 2021).

## 7.7. Principales conceptos prácticos

- La correcta nutrición del cultivo es clave para maximizar la productividad y la eficiencia de uso recursos e insumos involucrados en la producción de maíz. Es una condición necesaria, aunque no suficiente, para el logro de rendimientos altos y estables del cultivo.
- Nitrógeno, P, K, S y Zn son los nutrientes más frecuentemente deficientes en cultivos de maíz a escala global.
- Las deficiencias nutricionales impactan fundamentalmente en la tasa de crecimiento del cultivo afectando la eficiencia de intercepción y la eficiencia de uso de la radiación.
- El diagnóstico de necesidades de aplicación de nutrientes, vía abonos, enmiendas o fertilizantes, debe considerar la demanda del cultivo de acuerdo con el rendimiento objetivo, y la oferta del sistema según análisis de suelo.
- El monitoreo del estado nutricional del cultivo mediante análisis vegetales y/o sensores remotos o locales permite corregir situaciones de estrés a nivel de lote o ambiente.

- La nutrición del cultivo interactúa con la disponibilidad de recursos y con otras prácticas de manejo como la fecha de siembra, la elección del cultivar, la densidad de plantas, y el cultivo antecesor, involucrando tecnologías de conocimientos y procesos.
- El manejo nutricional del cultivo debe tener una mirada a escala de cultivo, pero también una acción a escala del sistema de producción en donde el maíz está involucrado.

## 7.8. Referencias

- Andrade F.H., H. Echeverría, N. Gonzalez y S. Uhart. 2002. Requerimientos de nutrientes minerales. Capítulo 8 en F. Andrade y V. Sadras (Eds). Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. INTA, Facultad de Ciencias Agrarias UNMP
- Appelhans S.C., P. Barbagelata, R. Melchiori et al. 2021. Is the Lack of Response of Maize to Fertilization in Soils with Low Bray1-P Related to Labile Organic Phosphorus? *J Soil Sci Plant Nutr* 21, 612–621. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00387-8>
- Aramburu Merlos F., J. Monzon, J. Mercou, M. Taboada, F. Andrade, A. Hall, E. Jobbagy, K. Cassman, y P. Grassini. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research*, 184, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.001>
- Arias Usandivaras L., F. H. Gutiérrez Boem y F. Salvagiotti. 2018. Contrasting Effects of Phosphorus and Potassium Deficiencies on Leaf Area Development in Maize. *Crop Sci.* 58:1–11. doi: 10.2135/cropsci2018.02.0092
- Aulakh M.S. y S. Malhi. 2004. Fertilizer nitrogen use efficiency as influenced by interactions with other nutrients. In: Mosier, A.R., Syers, J.K., Freney, J.R. (Eds.), *Agriculture and the Nitrogen Cycle: Assessing the Impacts of Fertilizer Use on Food Production and the Environment*. Island Press, Washington, USA, pp. 181–191.
- Barbagelata P. 2011. Fertilización fosfatada para trigo y maíz en siembra directa: diagnóstico de fertilidad y estrategias de fertilización. Simposio Fertilidad 2011. IPNI-Fertilizar AC. <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1018>
- Barbazán M., C. Bautes, L. Beux, M. Bordoli J.D. Cano, O. Ernst, A. García, F. O. García y A. Quincke. 2011. Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay: rendimiento según análisis de suelos. *Agrociencia Uruguay*; 15 2:93-99. <https://doi.org/10.31285/AGRO.15.597>
- Barbieri P. A., H. E. Echeverría, H. R. Saínz Rozas, y F. H. Andrade. 2008. Nitrogen Use Efficiency in Maize as Affected by Nitrogen Availability and Row Spacing. *Agron. J.* 100:1094–1100. doi:10.2134/agronj2006.0057
- Barbieri P. A., H. E. Echeverría, H. R. Saínz Rozas, y F. H. Andrade. 2013. Nitrogen status in maize grown at different row spacings and nitrogen availability. *Can. J. Plant Sci.* 93: 1049-1058 doi:10.4141/CJPS2012-170
- Barbieri P. A., H. R. Saínz Rozas, N. Wyngaard, M. Eyherabide, N. I. Reussi Calvo, F. Salvagiotti, A. A. Correndo, P. A. Barbagelata, G. P. Esposito Goya, J. C. Colazo, et al. 2017. Can edaphic variables improve DTPA-based zinc diagnosis in corn? *Soil Science Society of America Journal* 81 (3):556–63. DOI: 10.2136/sssaj2016.09.0316
- Bell M.J., M. Thompson y P. Moody. 2021. Using Soil Tests to Evaluate Plant Availability of

- Potassium in Soils. In: Murrell T.S., Mikkelsen R.L., Sulewski G., Norton R., Thompson M.L. (eds) *Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-59197-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-59197-7_8)
- Bender R., J. W. Haegele, M. L. Ruffo, y F. E. Below. 2013. Nutrient Uptake, Partitioning, and Remobilization in Modern, Transgenic Insect-Protected Maize Hybrids. *Agron. J.* 105:161-170. doi:10.2134/agronj2012.0352
- Binford G.D., A.M. Blackmer y M.E. Cerrato. 1992. Relationships between maize yields and soil nitrate in late spring. *Agron. J.* 84:53-59.
- Blackmer A.M., R.D. Voss y A.P. Mallarino. 1997. Nitrogen fertilizer recommendations for corn in Iowa. Available at <http://www.extension.iastate.edu/Publications/PM1714.pdf>. Univ. Ext., Iowa State Univ., Ames.
- Bordoli M. y A. P. Mallarino. 1998. Deep and Shallow Banding of Phosphorus and Potassium as Alternatives to Broadcast Fertilization for No-Till Corn. *Agron. J.* 90: 27-33. <https://doi.org/10.2134/agronj1998.00021962009000010006x>
- Borras L., J. Curá, y M. E. Otegui. 2002. Maize Kernel Composition and Post-Flowering Source-Sink Ratio. *Crop Sci.* 42:781-790.
- Burzaco J. P., I. A. Ciampitti, y T. J. Vyn. 2014. Nitrapyrin Impacts on Maize Yield and Nitrogen Use Efficiency with Spring-Applied Nitrogen: Field Studies vs. Meta-Analysis Comparison. *Agron. J.* 106:753-760. doi:10.2134/agronj2013.0043
- Cadot S., Bélanger, G., Ziadi, N., Morel, C., Sinaj, S., 2018. Critical plant and soil phosphorus for wheat, maize, and rapeseed after 44 years of P fertilization. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 112, 417-433.
- Carciochi W. D., I. Massigoge, A. Lapaz Oliveira, N. I. Reussi Calvo, F. Cafaro La Menza, H. R. Sainz Rozas, P. A. Barbieri, M. Di Napoli, J. González Montaner, I. A. Ciampitti. 2021. Cover crop species can increase or decrease the fertilizer-nitrogen requirement in maize. *Agron. J.* 113:5412-5423. <https://doi.org/10.1002/agj2.20791>
- Carciochi W., F. Salvagiotti, A. Pagani, N. I. Reussi Calvo, M. Eyherabide, H. R. Sainz Rozas, I. A. Ciampitti. 2020. Nitrogen and sulfur interaction on nutrient use efficiencies and diagnostic tools in maize, *Eur. J. Agron.* 116:126045. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126045>
- Carciochi W.D., N. Wyngaard, G.A. Divito, N.I.R. Calvo, M.L. Cabrera, y H.E. Echeverría. 2016. Diagnosis of sulfur availability for corn based on soil analysis. *Biol. Fertil. Soils* 52:917-926. doi:10.1007/s00374-016-1130-8
- Carciochi W. D., N. Wyngaard, N. I. Reussi Calvo, A. Pagani, G. A. Divito, H. E. Echeverría, y I. A. Ciampitti. 2019. Critical Sulfur Dilution Curve and Sulfur Nutrition Index in Maize. *Agron. J.* 111:448-456. doi:10.2134/agronj2018.07.0467.
- Caviglia O. P., R.J.M. Melchiori, y V.O. Sadras. 2014. Nitrogen utilization efficiency in maize as affected by hybrid and N rate in late-sown crops. *Field Crops Research* 168. 2014. 27-37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2014.08.005>
- Ciampitti I. A., J. Fernández, S. Tamagno, B. Zhao, G. Lemaire, D. Makowski. 2021. Does the critical N dilution curve for maize crop vary across genotype x environment x management scenarios? - a Bayesian analysis. *European Journal of Agronomy* 123, 126202. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126202>.
- Ciampitti I.A., S.T. Murrell, J.J. Camberato, y T.J. Vyn. 2013. Maize nutrient accumulations and partitioning in response to plant density and nitrogen rate: I. Macronutrients. *Agron. J.* 105:783-795. doi:10.2134/agronj2012.0467
- Ciampitti I.A., y T.J. Vyn. 2012. Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review. *Field*

- Crops Res. 133:48–67. doi:10.1016/j.fcr.2012.03.008
- Ciampitti I.A., y T.J. Vyn. 2013. Maize nutrient accumulations and partitioning in response to plant density and nitrogen rate: II. Calcium, magnesium, and micronutrients. *Agron. J.* 105:1645. doi:10.2134/agronj2013.0126
- Ciampitti I. A. y T. J. Vyn. 2014a. Nutrient Sufficiency Concepts for Modern Corn Hybrids: Impacts of Management Practices and Yield Levels. *Crop Management* DOI 10.2134/CM-2013-0022-RS
- Ciampitti I. A. y T. J. Vyn. 2014b. Understanding Global and Historical Nutrient Use Efficiencies for Closing Maize Yield Gaps. *Agron. J.* 106:2107–2117. doi:10.2134/agronj14.0025
- Cirilo A.G., M. Actis, F.S. Borrás, J.L. Robutti, F.H. Andrade, y O.R. Valentinuz. 2011. Crop management affects dry milling quality of flint maize kernels. *Field Crops Res.* 122:140–150. doi:10.1016/j.fcr.2011.03.007
- Cirilo A.G., J. Dardanelli, M. Balzarini, F.H. Andrade, M. Cantarero, S. Luque, H.M. Pedrol. 2009. Morpho-physiological traits associated with maize crop adaptations to environments differing in nitrogen availability. *Field Crops Research* 113:116-124. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.04.011>
- Clark JD, Fernández FG, Veum KS, et al. 2020. Soil-nitrogen, potentially mineralizable-nitrogen, and field condition information marginally improves corn nitrogen management. *Agronomy Journal.* 2020;112:4332–4343. <https://doi.org/10.1002/agj2.20335>
- Colomb B., J. R. Kiniry, P. Debaeke. 2000. Effect of Soil Phosphorus on Leaf Development and Senescence Dynamics of Field-Grown Maize. *Agron. J.* 92:428–435. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.923428x>
- Correndo A. A. 2018. Variables asociadas a la respuesta a la fertilización con nitrógeno y fósforo en maíz y soja en región pampeana. (Magister tesis, Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires).
- Correndo A. y F. O. García. 2012. Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico: Cultivos extensivos. *Archivo Agronómico* No. 14. IPNI Cono Sur. Acasuso, Buenos Aires. 8 pp.
- Correndo A., F. Gutiérrez Boem, F. O. García, et al. 2021. Attainable yield and soil texture as drivers of maize response to nitrogen: A synthesis analysis for Argentina. *Field Crops Research* 273. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108299>
- D’Andrea K.E., Otegui, M.E., Cirilo, A.G., Eyherabide, G., 2009. Ecophysiological traits in maize hybrids and their parental inbred lines: phenotyping of responses to contrasting nitrogen supply levels. *Field Crops Res.* 114, 147–158.
- Eagle A. J., L. P. Olander, K. L. Locklier, J. B. Heffernan, E. S. Bernhardt. 2017. Fertilizer Management and Environmental Factors Drive N<sub>2</sub>O and NO<sub>3</sub> Losses in Corn: A Meta-Analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 81:1191–1202. doi:10.2136/sssaj2016.09.0281
- Echeverría H. E., H. R. Sainz Rozas, E. Herfurt, y S. A. Uhart. 2001. Nitrato en la base del tallo del maíz: Cambios durante la estación de crecimiento. *Ciencia Suelo.* 19:115-124.
- Fernández J., J. DeBruin, C. D. Messina, I. A. Ciampitti. 2020. Late-season nitrogen fertilization on maize yield: A meta-analysis. *Field Crops Research* 247:107586. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107586>.
- Ferraguti F y Salvagiotti F. 2014. La nutrición con nitrógeno y azufre en maíces de calidad Flint. Págs. 88-91. En: Borrás L. (Ed) Manejo eficiente del nitrógeno en maíces Flint. *Tecnigráfica -Rosario – Argentina.* Págs. 29-40.
- Furlani A. M. C., P. R. Furlani, A. R. Meda, y A. P. Duarte. 2005. Efficiency of maize cultivars for zinc uptake and use. *Scientia Agricola* 62 (3):264–73. DOI: 10.1590/S0103-

90162005000300010

- García F. O. y M. F. González Sanjuan. 2016. Consumo de fertilizantes en el mundo y en la Argentina. En R. S. Lavado (ed.). *Sustentabilidad de los agrosistemas y uso de fertilizantes*. Orientación Grafica Editora-AACS-Fertilizar AC. Pp. 61-84. Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-1922-18-5.
- García F. O., L. Picone, e I. A. Ciampitti. 2014. Fósforo. En Echeverría H. E. y F.O. García (ed.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Ediciones INTA. 2a. Edición. Buenos Aires, Argentina. ISBN 9-789875-215658. p. 229-264.
- Gastal F., Lemaire, G., Durand, J., Louarn, G., 2015. Quantifying crop responses to nitrogen and avenues to improve nitrogen-use efficiency. In: Sadras, V., Calderini, D. (Eds.), *Crop Physiology*. Elsevier Inc., pp. 161–206. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417104-6/00008-X>.
- Gregorich E. G. y C. F. Drury. 1996. Fertilizer increases corn yield and soil organic matter. *Better Crops* 80 (4):3-5. [http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/0/ECD294481A-7FC8885257D2E004 CB1DE/\\$FILE/%20BC-1996-4%20p3.pdf](http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/0/ECD294481A-7FC8885257D2E004 CB1DE/$FILE/%20BC-1996-4%20p3.pdf)
- Heffer P., A. Gruere, T. Roberts. 2017. Assessment of Fertilizer Use by Crop at the Global Level. International Fertilizer Association (IFA) and International Plant Nutrition Institute (IPNI). A/17/134 rev. [https://www.fertilizer.org/Public/Stewardship/Publication\\_Detail.aspx?SEQN=5406&PUBKEY= F7053A24-E1C0-45AB-8304-CE3519FAD968](https://www.fertilizer.org/Public/Stewardship/Publication_Detail.aspx?SEQN=5406&PUBKEY= F7053A24-E1C0-45AB-8304-CE3519FAD968)
- Hernández F., Amelong, A., y Borrás, L. 2014. Genotypic differences among argentinean maize hybrids in yield response to stand density. *Agron. J.* 106, 2316. doi: 10.2134/agronj14.0183
- Hernández M., L. Echarte, A. Della Maggiora, M. Cambareri, P. Barbieri, y D. Cerrudo. 2015. Maize water use efficiency and evapotranspiration response to N supply under contrasting soil water availability. *Field Crops Research* 178: 8-15.
- Herrera J., Rubio, G., Häner, L., Delgado, J., Lucho-Constantino, C., Islas-Valdez, S., & Pellet, D. 2016. Emerging and established technologies to increase nitrogen use efficiency of cereals. *Agronomy* 6,25. <https://doi.org/10.3390/agronomy6020025>
- IPNI. 2013. 4R de la nutrición de plantas: un manual para mejorar el manejo de la nutrición de plantas. T. W. Bruulsema; Paul E. Fixen; y Gavin D. Sulewski (ed.). Traducción al español. IPNI. Acassuso, Buenos Argentina. ISBN 978-987-24977-5-0.
- Iversen K. V., R. H. Fox, y W. P. Piekielek. 1985. The relationships between of nitrate concentration in young corn stalks to soil nitrogen availability and grain yields. *Agron. J.* 77:927-932.
- Jantalia CP, AD Halvorson, RF Follett, BJ Rodrigues Alves, JC Polidoro y S. Urquiaga. 2012. Nitrogen source effects on ammonia volatilization as measured with semi-static chambers. *Agron. J.* 104 (6), 1595-1603.
- Jones J. W. et al. The DSSAT cropping system model. *Europ. J. Agron.* 18, 235–265 (2003).
- Keating B. A. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur. J. Agron.* 18, 267–288 (2003).
- Kim S.U., Lee, H.H., Moon, S.M. et al. 2021. Nitrous oxide emissions and maize yield as influenced by nitrogen fertilization and tillage operations in upland soil. *Appl Biol Chem* 64, 18. <https://doi.org/10.1186/s13765-021-00593-7>
- Kumar P.A., Parry, M.A.J., Mitchell, R.A.C., Ahmad, A., Abrol, Y.P. 2002. Photosynthesis and Nitrogen-Use Efficiency. In: Foyer, C.H., Noctor, G. (eds) *Photosynthetic Nitrogen Assimilation and Associated Carbon and Respiratory Metabolism*. *Advances in Photosynthesis and Respiration*, vol 12. Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/0->

306-48138-3\_2

- Kumar A., M. Denre & R. Prasad. 2018 Critical limit of boron for maize (*Zea mays* L.) in red and lateritic soil of Jharkhand, India, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49:22, 2802-2813, DOI: 10.1080/00103624.2018.1546866
- Ladha J.K., Pathak, H., Krupnik, T.J., Six, J., Van Kessel, C. 2005. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. *Advances in Agronomy*, 87:85-156. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)87003-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)87003-8)
- Lassaletta L., Billen, G., Grizzetti, B., Anglade, J., Garnier, J., 2014. 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environ. Res. Lett.* 9 (10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105011>.
- Leikam D., R. Lamond, y D. Mengel. 2003. *Soil Test Interpretations and Fertilizer Recommendations*. Department of Agronomy, Kansas State University. MF-2586. Manhattan, Kansas, EE.UU. <https://bookstore.ksre.ksu.edu/pubs/mf2586.pdf>
- Lemaire G., L. Tang, G. Bélanger, Y. Zhu, M. H. Jeuffroy. 2021. Forward new paradigms for crop mineral nutrition and fertilization towards sustainable agriculture, *European Journal of Agronomy*, 125, 126248, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126248>.
- Liang H., Hu K., Batchelor W., Qi Z., Li B. 2016. An integrated soil-crop system model for water and nitrogen management in North China. *Sci Rep* 6, 25755. <https://doi.org/10.1038/srep25755>
- Liu D-Y, Zhang W, Liu Y-M, Chen X-P y Zou C-Q. 2020. Soil Application of Zinc Fertilizer Increases Maize Yield by Enhancing the Kernel Number and Kernel Weight of Inferior Grains. *Front. Plant Sci.* 11:188. doi: 10.3389/fpls.2020.00188
- Liu S., Wang, X., Yin, X. et al. 2019. Ammonia Volatilization Loss and Corn Nitrogen Nutrition and Productivity with Efficiency Enhanced UAN and Urea under No-tillage. *Sci Rep* 9, 6610. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42912-5>
- Liu X., Jin, J., He, P. Liu H., Li W. 2007. Relationship between potassium chloride suppression of corn stalk rot and soil microorganism characteristics. *Front. Agric. China* 1, 136–141. <https://doi.org/10.1007/s11703-007-0024-9>
- Lordkaew S; B Dell; S Jamjod & B Rerkasem. 2011. Boron deficiency in maize. *Plant and soil*, 342(1-2), 207-220.
- Lü P., Zhang J.W., Jin L.B., Liu W., Dong S.T., Liu P. 2012. Effects of nitrogen application stage on grain yield and nitrogen use efficiency of high-yield summer maize. *Plant Soil Environ.*, 58: 211-216. <https://doi.org/10.17221/531/2011-PSE>
- Magdoff F.R., D. Ross, y J. Amadon. 1984. A soil test for nitrogen availability to maize. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:1301–1304.
- Majumdar K.; S. Zingore; F.O. García; A. Correndo; J. Timsina; y A. M. Johnston. 2016. Improving nutrient management for sustainable intensification of maize. In D. Watson (ed.). *Achieving sustainable cultivation of maize. Volume 2: Cultivation techniques, pest, and disease control*. Burleigh Dodds Science Publishing Limited. <http://dx.doi.org/10.19103/AS.2016.0002.08>
- Mallarino A. P y J. Sawyer. 2018. *Phosphorus and Potassium Tissue Testing in Corn and Soybean*. CROP 3153. Iowa State University Extension and Outreach, Ames, Iowa, USA. <https://store.extension.iastate.edu/product/15421>
- Mallarino A. P., Sawyer, J. y Barnhart, S. 2013. *A general guide for crop nutrient and limestone recommendations in Iowa*. PM 1688. Iowa State University Extension and Outreach, Ames, Iowa, USA. <https://dr.lib.iastate.edu/handle/20.500.12876/34144>
- Maltese N.E., G.A. Maddonni, R.J.M. Melchiori, J.M. Ferreyra, O.P. Caviglia. 2020. Crop ni-

- trogen status of early- and late-sown maize at different plant densities. *Field Crops Research* 258: 107965 <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107965>
- Manenti L, F. O. García y G. Rubio. 2020. El rol de la fertilización en la eficiencia de uso de agua en cultivos de la región pampeana. XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Octubre 2020. AACs. Disponible en <http://www.suelos.org.ar/sitio/cacs-2020-descarga-de-contribuciones/>
- Martínez-Cuesta N., W. Carciocchi , H. Sainz-Rozas , F. Salvagiotti , J. C. Colazo , N. Wyngaard , M. Eyherabide , G. Ferraris y P. Barbieri. 2020a. Effect of zinc application strategies on maize grain yield and zinc concentration in mollisols, *Journal of Plant Nutrition*, DOI: 10.1080/01904167.2020.1844754
- Martínez Cuesta N., N. Wyngaard, H. Sainz Rozas, M. Eyherabide, W. Carciocchi y P.Barbieri. 2018. Respuesta a la fertilización con boro en maíz. *Actas XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Tucumán. AACs.
- Martínez Cuesta N, N. Wyngaard, H. Saínz Rozas, et al. 2020b. Determining mehlich-3 and DTPA extractable soil zinc optimum economic threshold for maize. *Soil Use Manage* 2020;00:1–13. <https://doi.org/10.1111/sum.12657>
- McDaniel M.D., D.T. Walters, L.G. Bundy, X. Li, R.A. Drijber, J.E. Sawyer, M.J. Castellano, C.A.M. Laboski, P.C. Scharf, y W.R. Horwath. 2020. Combination of biological and chemical soil tests best predict maize nitrogen response. *Agron. J.* 2020: 1–16. DOI: 10.1002/agj2.20129
- McLellan E. L., K. G Cassman, A. J Eagle, P. B Woodbury, S. Sela, C. Tonitto, R. D Marjerson, H. M van Es. 2018. The Nitrogen Balancing Act: Tracking the Environmental Performance of Food Production, *BioScience*, 68 (3), 194–203, <https://doi.org/10.1093/biosci/bix164>
- Meisinger J. J. 1984. Evaluating plant-available nitrogen in soil-crop systems. pp. 391-416. En: R.D. Hauck (ed.). *Nitrogen in Crop Production*. ASA-CSSA-SSSA. Madison, USA.
- Melchiori R.J.M. 2010. Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos: una mirada desde el cultivo para el manejo de nitrógeno. *Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. 31 de Mayo al 4 de Junio de 2010. Rosario, Argentina. AACs. Cd-rom.
- Melchiori R.J.M. 2012. Fertilización variable con N: herramientas, criterios y recomendaciones. 19th ISTRO Conference – IV SUCS Meeting. Striving for Sustainable High Productivity. 24-28 Septiembre 2012. Montevideo, Uruguay.
- Melgar R., J. Lavandera, M. Torres Duggan y L. Ventimiglia. 2001. Respuesta a la fertilización con boro y zinc en sistemas intensivos de producción de maíz. *Ciencia del Suelo* 19(2): 109-114.
- Melkonian J.J., H.M. van Es, A.T. DeGaetano, y L. Joseph. 2008. ADAPT-N: Adaptive nitrogen management for maize using high resolution climate data and model simulations. In: R. Khosla, editor, *Proceedings 9th International Conference on Precision Agriculture*, Denver, CO. 18–21 July 2010. International Soc. Precision Agric., Monticello, IL.
- Mercau J.L. 2010. Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos: una mirada con lentes de modelos funcionales de cultivo. *Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. 31 de Mayo al 4 de Junio de 2010. Rosario, Argentina. AACs. Cd-rom.
- Mercau J.L.; Otegui, M.E. 2014. a modeling approach to explore water management strategies for late-sown maize and double-cropped wheat- maize in the rain-fed Pampas region of Argentina. en: Lajpat Ahuja, Liwang Ma, Robert Lascano (eds), *Advances in*

- agricultural Systems Modeling. ASA-CSSA-SSSA, Baltimore, EEUU. 351-374 p.
- Mitter EK, Tosi M, Obregón D, Dunfield KE y Germida JJ. 2021. Rethinking Crop Nutrition in Times of Modern Microbiology: Innovative Biofertilizer Technologies. *Front. Sustain. Food Syst.* 5:606815. doi: 10.3389/fsufs.2021.606815
- Morris T.F., Murrell, T.S., Beegle, D.B., Camberato, J.J., Ferguson, R.B., Grove, J., Ketterings, Q., Kyveryga, P.M., Laboski, C.A., McGrath, J.M., Meisinger, J.J., Melkonian, J., Moebius-Clune, B.N., Nafziger, E.D., Osmond, D., Sawyer, J.E., Scharf, P.C., Smith, W., Spargo, J.T., van Es, H.M., Yang, H., 2018. Strengths and limitations of nitrogen rate recommendations for corn and opportunities for improvement. *Agron. J.* 110, 1–37. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.02.0112>.
- Mueller N., J. Gerber, M. Johnston, D. Ray, N. Ramankutty, J. Foley. 2012. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature* 490, 254–257. <https://doi.org/10.1038/nature11420>
- Mueller SM; JJ Camberato; C Messina; J Shanahan; H Zhang y TJ Vyn. 2017. Late-split nitrogen applications increased maize plant nitrogen recovery but not yield under moderate to high nitrogen rates. *Agron J* 109: 2689-2699.
- Mueller S.M., y T.J. Vyn. 2016. Maize plant resilience to N stress and post-silking N capacity changes over time: A review. *Front. Plant Sci.* 7:1–14. doi:10.3389/fpls.2016.00053
- Murungu FS, Chiduzza C, Muchaonyerwa P, Mnkeni PNS. 2011. Decomposition, nitrogen and phosphorus mineralization from winter-grown cover crop residues and suitability for a smallholder farming system in South Africa. *Nutr Cycl Agroecosyst* 89:115–123. DOI 10.1007/s10705-010-9381-5.
- Nasielski J., Deen, B., 2019. Nitrogen applications made close to silking: implications for yield formation in maize. *Field Crops Res.* 243, 107621. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107621>
- Nguy-Robertson A., Y. Peng, T. Arkebauer, D. Scoby, J. Schepers y A. Gitelson. 2015. Using a Simple Leaf Color Chart to Estimate Leaf and Canopy Chlorophyll a Content in Maize (*Zea mays*). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46:21, 2734-2745, DOI: 10.1080/00103624.2015.1093639
- Nosetto M.D., Jobbágy, E.G., Jackson, R.B, Sznaider, G.A., 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Research.* 113: 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.04.016>
- Orcellet J., Reussi Calvo, N. I., Sainz Rozas, H. R., Wyngaard, N., y Echeverría, H. E. 2017. Anaerobically incubated nitrogen improved nitrogen diagnosis in corn. *Agronomy Journal*, 109, 291– 298. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.02.0115>
- Pagani A., H. E. Echeverría, F. H. Andrade y H. R. Sainz Rozas. 2012. Effects of nitrogen and sulfur application on grain yield, nutrient accumulation, and harvest indexes in maize. *Journal of Plant Nutrition*, 35:7, 1080-1097. <http://dx.doi.org/10.1080/01904167.2012.671410>
- Pagani A., H.E. Echeverría, y H.R. Sainz Rozas. 2009. Respuesta a nitrógeno y azufre en el cultivo de maíz en diferentes ambientes de la provincia de Buenos Aires. *Ciencia del Suelo* 27 (1): 21-30.
- Pagani A., H. E. Echeverría, H. R. Sainz Rozas y P. A. Barbieri. 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *CI. SUELO (ARGENTINA)* 26(2): 183-193.
- Palma RM, Rímolo M, Saubidet MI y Conti ME. 1997. Influence of tillage system on denitrification in maize cropped soils. *Biology and Fertility of Soils* 25: 142-146.
- Pias OHC, Tiecher T, Cherubin MR, Mazurana M, Bayer C. 2019. Crop yield responses to

- sulfur fertilization in Brazilian no-till soils: a systematic review. *Rev Bras Cienc Solo*. 2019; 43:e0180078. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc2018007>
- Plénet D., A. Mollier y S. Pellerin. 2000. Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency. II. Radiation-use efficiency, biomass accumulation and yield components. *Plant and Soil* 224: 259–272. <https://doi.org/10.1023/A:1004835621371>
- Poffenbarger H., S. B. Mirsky, R. R. Weil, M. Kramer, J. T. Spargo, y M. A. Cavigelli. 2015. Legume proportion, poultry litter, and tillage effects on cover crop decomposition. *Agron. J.* 107, 2083–2096. doi:10.2134/agronj15.0065
- Prado R. M., F. M. Fernandes, C. G. Roque. 2001. Resposta da cultura do milho a modos de aplicação e doses de fósforo, em adubação de manutenção. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:83-90.
- Prystupa P., M. Torres Duggan y G. A. Ferraris. 2012. Tecnología de aplicación de micronutrientes en la región pampeana argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 5:2-8. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2012/03/2.pdf>.
- Puntel L. A., A. Pagani, y S. V. Archontoulis. 2019. Development of a nitrogen recommendation tool for corn considering static and dynamic variables. *European Journal of Agronomy* 105: 189–199. doi 10.1016/j.eja.2019.01.003
- Puntel LA, Sawyer JE, Barker DW, Dietzel R, Poffenbarger H, Castellano MJ, Moore KJ, Thorburn P y Archontoulis SV. 2016. Modeling Long-Term Corn Yield Response to Nitrogen Rate and Crop Rotation. *Front. Plant Sci.* 7:1630. doi: 10.3389/fpls.2016.01630
- Ranells N. N., y Waggener, M. G. 1996. Nitrogen release from grass and legume cover crop monocultures and bicultures. *Agronomy Journal*, 88(5), 777–782. <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800050015x>
- Reussi Calvo N.; N Wyngaard; J. Orcellet; H. Sainz Rozas y H. Echeverría. 2018. Predicting Field Apparent Nitrogen Mineralization from Anaerobically Incubated Nitrogen. *Soil Sci Soc Am J* doi:10.2136/sssaj2017.11.0395.
- Rizzo, G., J. Rattalino Edreira, S. Archontoulis, H. Yang y P. Grassini., 2018. Do shallow water tables contribute to high and stable maize yields in the US Corn Belt? *Global Food Security*, Vol 18, pgs. 27–34.
- Rossini M.A., G. Maddonni y M.E. Otegui. 2012. Inter-plant competition for resources in maize crops grown under contrasting nitrogen supply and density: Variability in plant and ear growth. *Field Crop Res.* 121:373-380.
- Ruffo M., R. Olson y I. Daverede. 2016. Maize Yield Response to zinc Sources and Effectiveness of Diagnostic Indicators. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47:2, 137-141, DOI: 10.1080/00103624.2015.1108433
- Ruiz A., F. Salvagiotti, B. L. Gambin, L. Borrás. 2021. Maize nitrogen management in soils with influencing water tables within optimum depth. *Crop Science*: 61:1386–1399. <https://doi.org/10.1002/csc2.20379>.
- Sainz Rozas, H., P. Calviño, H. Echeverría, M. Redolatti y P. Barbieri. 2008. Contribution of anaerobically mineralized nitrogen to reliability of planting or presidedress soil nitrogen test in maize. *Agronomy Journal*, 100, 1020–1025. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0077>
- Sainz Rozas H., H. Echeverría y P. A. Barbieri. 2004. Nitrogen Balance as Affected by Application Time and Nitrogen Fertilizer Rate in Irrigated No-Tillage Maize. *Agron. J.* 96: 1622-1631.
- Sainz Rozas H, Echeverría HE y Picone LI. 2001. Denitrification in maize under no-tillage: effect of nitrogen rate and application time. *Soil Science Society of America Journal*

- 65:1314-1323.
- Sainz Rozas H., N. I. Reussi Calvo, P. A. Barbieri. 2019. Uso del índice de verdor para determinar la dosis óptima económica de nitrógeno en maíz. *Cienc. Suelo (Argentina)* 37 (2): 246-256
- Salvagiotti, F., J. Enrico, M. Agosti, M. Barraco, E. Kehoe, M. Biassoni, A. Ruiz y S. Bacigalupo. 2021. Producción de vicia y respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz de siembra tardía. *Actas Congreso Maíz Tardío*. <https://www.congresomaiztardio.com.ar/poster-page.php?poster=28>
- Salvagiotti F., J. Enrico, M. Barraco, G. Prieto y M. Agosti. 2016. Componentes de la eficiencia de N en maíz de siembra tardía con diferentes antecesores. *Actas XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Rio Cuarto. Argentina.
- Salvagiotti F., P. Prystupa, G. Ferraris, L. Couretot, L. Magnano, D. Dignani y F. Gutiérrez-Boem, F. H. 2017. N:P:S stoichiometry in grains and physiological attributes associated with grain yield in maize as affected by phosphorus and sulfur nutrition. *Field Crops Research*, 203, 128–138. doi: 10.1016/j.fcr.2016.12.019.
- Sarlangue T., F. Andrade, P. Calviño y L. Purcell. 2007. Why do maize hybrids respond differently to variations in plant density? *Agron. J.* 99:984-991.
- Satorre E.H., J.R. Micheloud, J. Belligoi, y J.L. Cavasassi. 2006. MAICERO: Nuevos Criterios para el Diagnóstico y Manejo de la Fertilización del Cultivo de Maíz en Argentina. *Convenio AACREA y PROFERTIL S.A.*, software de aplicación agronómica.
- Sawyer J., E. Nafziger, G. Randall, L. Bundy, G. Rehm, y B. Joern. 2006. Concepts and rationale for regional nitrogen rate guidelines for corn. PM 2015. Iowa State Univ. Ext., Ames, Iowa, EE.UU. <https://dr.lib.iastate.edu/handle/20.500.12876/33370>
- Scharf PC; W. Wiebold y J. Lory. 2002. Corn Yield Response to Nitrogen Fertilizer Timing and Deficiency Level. *Agron. J.* 94:435-441. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.4350>
- Setiyono, T.D., Walters, D.T., Cassman, K.G., Witt, C., Dobermann, A., 2010. Estimating maize nutrient uptake requirements. *Field Crops Res.* 118, 158–168.
- Setiyono T.D., H. Yang, D.T. Walters, A. Dobermann, R.B. Ferguson, D.F. Roberts et al. 2011. Maize-N: A decision tool for nitrogen management in maize. *Agron. J.* 103:1276–1283. doi:10.2134/agronj2011.0053
- Shanahan J.F., N.R. Kitchen, W.R. Raun, y J.S. Schepers. 2008. Responsive in-season nitrogen management for cereals. *Computers and Electronics in Agriculture* 6(1): 51–62.
- Shorrocks V. 1997. The occurrence and correction of boron deficiency. *Plant and Soil* 193: 121–148.
- Sievers, T., y R. Cook. 2018. Aboveground and Root Decomposition of Cereal Rye and Hairy Vetch Cover Crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 82, 147–155. doi:10.2136/sssaj2017.05.0139
- Silva A. G., C. H. Sequeira, R. A. Sermarini, y R. Otto. 2017. Urease Inhibitor NBPT on Ammonia Volatilization and Crop Productivity: A Meta-Analysis. *Agronomy Journal* 109: 1-13. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.04.0200>
- Sims J.T. y G. Johnson. 1991. Micronutrient soil tests. p. 427-476. In J.J. Mortvedt, F.R. Cox, L.M. Shuman and R.M. Welch (eds.), *Micronutrients in Agriculture*. 2nd ed. SSSA Book Series No. 4. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- Singh J. y Y V. Singh. 2021. Prediction of spring maize yields using leaf color chart, chlorophyll meter, and GreenSeeker optical sensor. *Experimental Agriculture*, 57(1), 45-56. doi:10.1017/S0014479721000028
- Sucunza F., F. Gutierrez Boem, F. O. García, M. Boxler y G. Rubio. 2018. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean, and maize on Mollisols: Soil test trends, critical

- levels and balances. *Eur. J. Agron.* 96:87-95. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.03.004>
- Ta C. T. y R. T. Weiland. 1992. Nitrogen partitioning in maize during ear development. *Crop Sci.* 32:443-451.
- Tamagno S., A. J. Eagle, E. L. McLellan, C. van Kessel, B. A. Linqvist, J. K. Ladha y C. M. Pittelkow. 2022. Quantifying N leaching losses as a function of N balance: A path to sustainable food supply chains. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 324, 107714, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107714>.
- Uhart S.A. y F.H. Andrade 1995. Nitrogen deficiency and maize: I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning and kernel set. *Crop Sci.* 35:1376-1383.
- Uhart S. A., y F. H. Andrade. 1996. Curva de dilución de N uy fertilización nitrogenada en maíz. XXI Reunión Argentina de Fisiología Vegetal. 20-22 Marzo 1996. Lujan, Mendoza. Pp. 448-449.
- Vitantonio-Mazzini L., L. Borrás, L. Garibaldi, D. H. Pérez, S. Gallo, y B. Gambin. 2020. Management options for reducing maize yield gaps in contrasting sowing dates. *Field Crops Research* 251, 107779. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107779>
- Vyn T. J. y K. J. Janovicek. 2001. Potassium Placement and Tillage System Effects on Corn Response following Long-Term No Till. *Agron. J.* 93:487-495.
- Wang Y., E. Wang, D. Wang, S. Huang, Y. Ma, C. J. Smith y L. Wang. 2010. Crop productivity and nutrient use efficiency as affected by long-term fertilisation in North China Plain. *Nutr Cycl Agroecosyst* 86, 105-119. <https://doi.org/10.1007/s10705-009-9276-5>
- Withers P. A., R. Sylvester-Bradley, D. L. Jones, J. R. Healey y P. J. Talboys. 2014. Feed the Crop Not the Soil: Rethinking Phosphorus Management in the Food Chain. *Environmental Science & Technology* 48 (12), 6523-6530. DOI: 10.1021/es501670j.
- Xu X., P. He, M. F. Pampolino, L. Chuan, A. M. Johnston, S. Qiu, S. Zhao y W. Zhou. 2013. Nutrient requirements for maize in China based on QUEFTS analysis. *Field Crops Research*, 150: 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.06.006>.
- Zeffa D. M., L. H. Fantin, O. J. A. P. Santos, A. L. M. Oliveira, M. G. Canteri., C. A. Scapim, y L. S. A. Gonçalves. 2018. The influence of topdressing nitrogen on *Azospirillum spp.* inoculation in maize crops through meta-analysis. *Bragantia*, Campinas, 77, 3, 493-500. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.2017273>
- Zhang M., J. Zhou, K. A. Sudduth y N. R. Kitchen. 2020. Estimation of maize yield and effects of variable-rate nitrogen application using UAV-based RGB imagery. *Biosystems Engineering*, 189: 24-35. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.11.001>.
- Zhao B., X. Niub, S. Tahir Ata-Ul-Karim, L. Wang, A. Duan, Z. Liu y G. Lemaire. 2020. Determination of the post-anthesis nitrogen status using ear critical nitrogen dilution curve and its implications for nitrogen management in maize and wheat. *European Journal of Agronomy* 113, 125967. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125967>
- Ziadi N., M. Brassard, G. B'elanger, A. Claessens, N. Tremblay, A. Cambouris, M. Nolin y L. Parent. 2008. Chlorophyll measurements and nitrogen nutrition index for the evaluation of corn nitrogen status. *Agron. J.* 100: 1264-1273. doi:10.2134/agronj2008.0016