

Desarrollo de un modelo de balance de nitrógeno en trigo para la Región Semiárida Pampeana

N.F. Romano¹, R. Álvarez^{2,3}, A.A. Bono^{1,*} y H.S. Steinbach²

Introducción

Una de las principales fuentes de nitrógeno (N) utilizada por los cultivos es la mineralización de la materia orgánica (MO) del suelo. Durante los últimos 30 años se han realizado numerosas investigaciones en metodologías para cuantificar dicho flujo. En general, estas metodologías incluyen técnicas de incubación en laboratorio o métodos de campo, donde se logra estimar el aporte de N durante el ciclo del cultivo (Mikha et al., 2006). Cuantificando este flujo se han desarrollado metodologías de balance de masas que permiten estimar las dosis de fertilizante nitrogenado necesarias para los cultivos (Meisinger, 1984; Álvarez et al., 2004).

En la Pampa Ondulada argentina se han realizado trabajos de estimación de las fracciones de N mineral por balance de masas que han indicado que aproximadamente el 50% del total de N que absorbe el trigo se origina en el suelo (Álvarez y Steinbach, 2006). En la Pampa Semiárida, se ha realizado solo un experimento en trigo que indicó que este aporte de N desde el suelo rondó el 70% (Bono y Álvarez, 2013). Entre 1996 y 2004, en la misma región se realizó una red de ensayos de fertilización que permitió generar un modelo explicativo del rendimiento de trigo con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.48. En el mismo se utilizaron como variables independientes la humedad a la siembra, el N orgánico del suelo, el contenido de N mineral más la dosis de N del fertilizante, la profundidad del perfil, la textura y el sistema de labranza (Bono y Álvarez, 2009). En consecuencia, las variables relacionadas con el agua y el N del suelo explican el rendimiento del cultivo de trigo en la región. Sin embargo, al pasar el tiempo los modelos basados en curvas de rendimiento, como el indicado, pierden actualidad por incrementarse los rendimientos alcanzables.

Contrastando con información de la Pampa Ondulada, donde el proceso de mineralización de N se da principalmente en el horizonte superficial (Álvarez, 1999), en la Pampa Semiárida las capas profundas mineralizan proporcionalmente más N que en suelos con horizonte B fuertemente textural (Bono y Álvarez, 2013). Por consiguiente, deberían determinarse los coeficientes de mineralización propios de los suelos de la región. Sin embargo, no se ha realizado todavía una evaluación regional de la capacidad de los suelos de la Región Semiárida de mineralizar N y la posibilidad de usar la metodología del balance para la estimación de los requerimientos de fertilización nitrogenada. Nuestros objetivos fueron:

- Determinar la mineralización de N en suelos de la Región Semiárida.
- Comparar los requerimientos de N entre la Región Semiárida y la Pampa Ondulada.

- Desarrollar un modelo de balance de N ajustado para la Región Semiárida.

Materiales y métodos

Se utilizaron datos publicados de la Pampa Ondulada generados en 58 experimentos a campo realizados entre 1997 y 1999 bajo escenarios diferentes de suelo y manejo (Álvarez et al., 2004). De estos ensayos 26 recibieron algún tipo de labranza (cincel, rastra de discos o rejas) y 32 fueron realizados en siembra directa. Los antecesores fueron soja en 26 sitios y maíz en los 32 restantes. De estos ensayos se obtuvieron los datos de suelo, precipitaciones, cantidades de residuos de los cultivos antecesores al inicio y final del trigo, biomasa aérea y de granos de trigo.

En la Pampa Semiárida se estableció una red de 46 experimentos de campo entre 2009 y 2011 en el este de la provincia de La Pampa. Al momento de la siembra del trigo se determinó N como nitrato ($N-NO_3^-$) y amonio ($N-NH_4^+$) en capas de 20 cm hasta los 100 cm por destilación con vapor (Bremmer, 1965) usando muestras compuestas de tres sub-muestras tomadas del área en que se instalaría cada experimento. Se utilizó un diseño compuesto de dos tratamientos con y sin fertilización con una dosis de 50 kg N ha⁻¹ sin repeticiones. Se realizaron determinaciones de N total (autoanalizador), textura (hidrómetro de Bouyucos), fósforo (P) extractable (Bray y Kurtz N° 1) y densidad aparente (cilindros de 250 cm³). También se determinó biomasa de residuos del cultivo antecesor al momento de la siembra con un marco de 2500 cm², recogiendo 4 sub-muestras por parcela. En el caso de los residuos enterrados se tomaron 4 sub-muestras por parcela con un cilindro de 16 cm de diámetro y 25 cm de profundidad. El contenido de cada cilindro fue lavado y pasado por tamiz de 2 mm, para luego el material vegetal ser secado en estufa (60 °C) hasta peso constante. Se determinó N en el material vegetal por digestión seca con autoanalizador. Se realizaron test aeróbicos de mineralización in vitro según se describe en Álvarez et al. (2004). Se midió humedad de suelo en todo el perfil por gravimetría y se tomaron los registros de precipitación. En madurez fisiológica se determinó producción de grano, biomasa aérea y de raíces del cultivo. Además se midió biomasa de residuos del cultivo antecesor a cosecha de la misma forma que a la siembra. Se tomaron tres sub-muestras por tratamiento de 1 m² para biomasa aérea y de 3 m² para la determinación de rendimiento. El N liberado por los residuos durante el ciclo del trigo se estimó como la diferencia entre el contenido inicial y final de N en los residuos afectada por un factor de liberación (Álvarez et al., 2004). También se determinó amonio y nitrato hasta 1 m tomando tres sub-muestras por tratamiento de la misma manera que a la siembra.

Para calcular el balance de masas de N se usó el modelo propuesto por Álvarez et al. (2004):

$$\text{N-planta} = \text{N-mineral} + \text{N-residuos} + \text{N-mineralización}$$

Donde:

N-planta = N absorbido por el cultivo.

N-mineral = diferencia entre el contenido de N-NH_4^+ y N-NO_3^- a la siembra (0-60 cm) + dosis de N del fertilizante, respecto del nivel de N-NH_4^+ y N-NO_3^- a la cosecha.

N-residuos = N liberado por los residuos en descomposición.

N-mineralización = N mineralizado neto desde el humus menos las pérdidas del agrosistema (volatilización + desnitrificación + lixiviación).

El término N-mineralización es llamado mineralización aparente y se calcula por diferencia determinando experimentalmente todos los demás términos del modelo. Con la información generada en las redes de Pampa Ondulada (Álvarez y Steinbach, 2006) y la Región Semiárida Pampeana (Bono y Álvarez, 2009) se cuantificaron las fracciones de N del modelo y se compararon estadísticamente por un test de t entre muestras independientes. También se calcularon la eficiencia de uso del agua (como el cociente entre rendimiento en grano y las precipitaciones acumuladas durante el barbecho y el ciclo del cultivo) y el coeficiente b de requerimiento de N (como el cociente entre el N-planta y el rendimiento en grano). Se utilizaron métodos de regresión múltiple para generar modelos predictivos de los términos del balance. Estas regresiones se integraron en un modelo predictivo de rendimiento en función de la oferta de N para el cultivo que puede ser usado para estimar la dosis de N necesaria a fin de alcanzar un rendimiento esperado.

Resultados y discusión

Los suelos de las dos redes experimentales fueron diferentes con amplios contrastes texturales y de contenido de N (**Tabla 1**). Los niveles de arcilla+limo, N-disponible (mineral del suelo+fertilizante) y N-total fueron el doble en los suelos de la Pampa Ondulada respecto de los de la Región Semiárida. El amonio representó un tercio del N mineral del suelo en las dos subregiones. La masa de residuos del cultivo antecesor y la capacidad de los suelos de mineralizar N in vitro de la primera subregión superaron en 3-4 veces a los de la segunda. También las precipitaciones durante el barbecho y el ciclo del trigo fueron un 50% más altas en la Pampa Ondulada. Como resultado de estas diferencias la capacidad de aporte de N de los suelos de la Pampa Ondulada, evidenciada por la magnitud de los términos N-mineral, N-residuos y N-planta del modelo de balance, fue mucho mayor que en la Región Semiárida (**Tabla 1**).

Contrariamente a lo esperado, el N-mineralización fue mayor en la Región Semiárida Pampeana respecto de la Pampa Ondulada. Como este último término se calculó por despeje del modelo este resultado parece deberse a la incertidumbre en las estimaciones de las otras fracciones de N o a mayores pérdidas y no a una mayor capacidad de mineralizar N de los suelos, pues el test in vitro de mineralización mostró claramente lo contrario. El requerimiento de N para formar grano (coeficiente b) fue algo mayor en la Región Semiárida. Esto se debió a que en varios experimentos de esta subregión el trigo estuvo severamente limitado por agua al final del ciclo reduciendo el rendimiento en grano alcanzado. En los agrosistemas de la Pampa Ondulada, más ricos en N, la eficiencia de uso del agua de lluvia fue mayor.

Las técnicas de regresión permitieron generar modelos predictivos de los términos de la ecuación de balance (**Tabla 2**). El pool N-mineral puede estimarse con el contenido inicial de N del suelo (amonio+nitrato) más la dosis de fertilizante, N-residuos usando como predictor el contenido de N en la biomasa de los residuos del antecesor y N-mineralizado tomando como variables predictivas el N del suelo + fertilizante, el N-total, la textura, la biomasa de residuos y las precipitaciones. El N-mineralización aumenta en suelos de textura gruesa, a medida que crece el pool (reservorio) de N-total y las

Tabla 1. Valores promedio de variables de clima, suelo y cultivo de los experimentos.

Parámetro (Unidad)	----- Región -----			
	---- Ondulada ----		---- Semiárida ----	
	Media	DE	Media	DE
A+L (t ha ⁻¹)	2438	379	1218	472
N-disponible (kg ha ⁻¹)	153	49	78	32
N-total (t ha ⁻¹)	6.1	1.0	3.4	0.6
N-incubación (kg ha ⁻¹)	167	62	44	21
Residuos (t h ⁻¹)	9.5	4.4	3.1	1.6
PPT (mm)	365	95	244	43
N-mineral (kg ha ⁻¹)	111	49	32	33
N-residuos (kg ha ⁻¹)	18	18	8	9
N-mineralización (kg ha ⁻¹)	38	63	53	46
N-planta (kg ha ⁻¹)	167	63	93	32
Rendimiento (t ha ⁻¹)	3.7	0.9	1.9	0.7
Coef. b (kg N t ⁻¹ grano)	45	14	50	7
EUA (kg grano mm ⁻¹)	11.1	4.3	7.9	2.8

A+L = arcilla + limo 0-30 cm

N-disponible = nitrógeno de amonio+nitrato (0-60 cm) + dosis nitrógeno fertilizante

N-total = nitrógeno del humus (total) 0-30 cm

N-incubación = nitrógeno mineralizado en incubación 0-30 cm

Residuos = materia seca de residuos del antecesor

PPT = precipitación de mayo a noviembre

N-mineral, N-residuos, N-mineralización y N-planta = ecuación de balance

Coef. b = N-planta/rendimiento

EUA = eficiencia de uso del agua, PPT/rendimiento

DE = desvío estándar

Tabla 2. Modelos de regresión predictivos de los términos de la ecuación de balance y del rendimiento de trigo para las dos regiones. N-mineral, N-residuos, N-mineralización, N-total, N-incubación, N-planta, Residuos y PPT igual significado que en la Tabla 1. N en residuos: masa de nitrógeno en los residuos al inicio del ciclo del trigo, NSF: nitrógeno de amonio y nitrato a la siembra (0-60 cm) + dosis de nitrógeno del fertilizante.

Variable dependiente	Modelo	R ²
N-mineral	$Y = NSF - 43^*$	0.93
N-residuos	$Y = 0.26 \text{ N en residuos} - 3.0$	0.63
N-mineralización	$Y = 110 - 1.3 \text{ NSF} + 0.068 \text{ NSF} * \text{N-total} + 0.0022 (A+L) * \text{Residuos} + 0.0014 \text{ NSF} * \text{PPT} + 0.00056 \text{ N-incubación} * \text{PPT}$	0.53
Rendimiento	$Y = -0.83 + 0.039 \text{ N-planta} - 0.000073 \text{ N-planta}^2$ Si N-planta < 269 kg ha ⁻¹ $Y = 4.5$ Si N-planta >= 269 kg ha ⁻¹	0.75

* El promedio de N mineral a madurez fisiológica fue de 43 kg ha⁻¹

Tabla 3. Dosis de N recomendada a aplicar en trigo para algunas combinaciones de tipo de suelo (N-total y textura) y antecesor en la Región Semiárida Pampeana en función del objetivo de rendimiento a alcanzar (a 14% de humedad de grano) y el nivel de N-mineral del suelo a la siembra. Los cálculos se han enmarcado en un escenario promedio de precipitación entre mayo y noviembre, capacidad de mineralización, biomasa y contenido de N para los antecesores según valores indicados en la Tabla 1. Cultivos de invierno incluye trigo, centeno y avena. Cultivos de verano incluye girasol, soja, maíz y sorgo. Las dosis que se indican en la Tabla son las obtenidas con el cálculo del modelo pero alguna de las combinaciones pueden no darse en la realidad, por ejemplo suelos arenosos y rendimientos objetivos altos.

N-total t ha ⁻¹	Arcilla+limo t ha ⁻¹	Cultivo Antecesor	Rend. objetivo t ha ⁻¹	N-suelo, kg ha ⁻¹				
				20	40	60	80	100
2.5	600	Invierno	2.0	0	0	0	0	0
			2.5	70	50	30	0	0
			3.0	150	130	110	90	70
3.5	1200	Invierno	2.0	0	0	0	0	0
			2.5	60	40	20	0	0
			3.0	120	100	80	60	40
4.5	1800	Invierno	2.0	0	0	0	0	0
			2.5	50	30	10	0	0
			3.0	100	80	60	40	20
2.5	600	Verano	2.0	0	0	0	0	0
			2.5	60	40	20	0	0
			3.0	140	120	100	80	60
3.5	1200	Verano	2.0	0	0	0	0	0
			2.5	60	40	20	0	0
			3.0	120	100	80	60	40
4.5	1800	Verano	2.0	10	0	0	0	0
			2.5	55	35	15	0	0
			3.0	110	90	70	50	30

precipitaciones, mientras que decrece a más biomasa de residuos y con el nivel inicial de N de suelo + fertilizante. A partir de N-planta se puede estimar con buen ajuste el rendimiento del cultivo usando un modelo curvilíneo-plateau (Tabla 2).

Es posible combinar las ecuaciones de la Tabla 2 en un modelo predictivo de rendimiento que, a partir de

las variables de sitio y las precipitaciones, estime el rendimiento esperado (Figura 1). Este modelo presentó un R² de 0.57 considerando las dos subregiones pampeanas estudiadas. El modelo puede usarse para la estimación de la dosis de fertilizante nitrogenado necesaria a fin de alcanzar un rendimiento objetivo, como se muestra en la Figura 2 para la Región Semiárida Pampeana. En función del nivel de N del suelo y el rendimiento esperado se estima

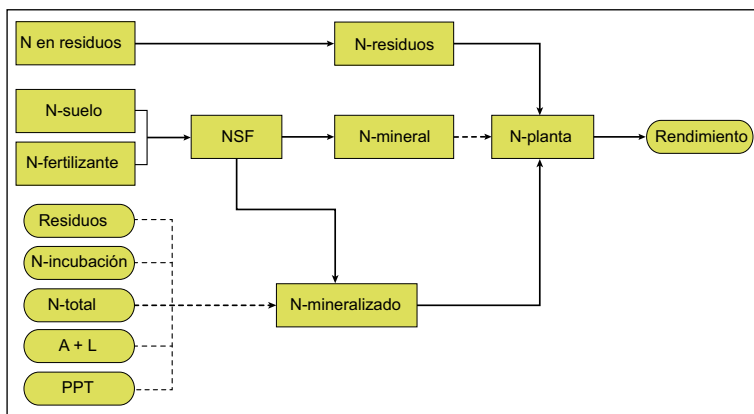


Figura 1. Esquema del modelo de cálculo para estimar rendimiento a partir de la disponibilidad de N y las precipitaciones en suelos de la Pampa Ondulada y la Región Semiárida Pampeana. Rectángulos = fracciones de N, líneas llenas = flujos de N, rectángulos con esquinas redondeadas = variables que aportan información, flechas punteadas = flujos de información. Abreviaturas con igual significado que en modelo de balance y Tablas 1 y 2.

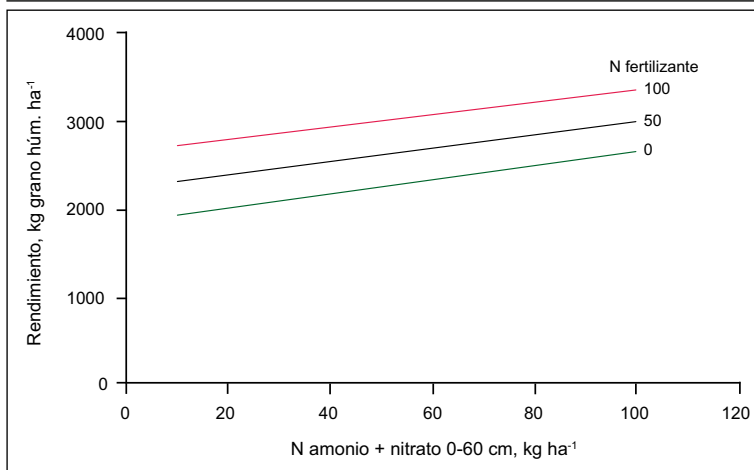


Figura 2. Rendimiento estimado de trigo en la Región Semiárida Pampeana en función de los contenidos de $N-NO_3^-$ y $N-NH_4^+$ a la siembra, bajo distintos escenarios de N aportado por el fertilizante. Las estimaciones de rendimiento esperado se han hecho para un suelo con características promedio y bajo un escenario de precipitaciones también promedio (Tabla 1).

la dosis de N. Las demás características de sitio pueden adecuarse a las del lote en que se hace la estimación, suponiendo un escenario de precipitaciones promedio. El modelo es fácilmente transcribible a una planilla de Excel siendo el rendimiento esperable el dato relevante que hay que fijar previamente al cálculo de la dosis.

Para la implementación del modelo de balance la mejor estimación del rendimiento objetivo se logra habitualmente usando el promedio histórico del lote en campañas previas, siempre y cuando no se haya producido un cambio tecnológico importante (Álvarez et al., 2013). El modelo propuesto para la Región Semiárida requiere de variables estables de fácil obtención como N-total, textura y precipitaciones, también una variable que debe determinarse por muestreo en cada campaña, el nivel de N mineral del suelo, y dos variables a determinar para cada cultivo pero de difícil obtención, como son la biomasa de

residuos del cultivo antecesor y su contenido de N. Para soslayar esta dificultad se ha calculado con el modelo una tabla de dosis de N a aplicar para algunas combinaciones comunes de tipo de suelo y antecesor en la Región Semiárida Pampeana (Tabla 3). Esta tabla simplifica el uso del balance en la región.

Los experimentos realizados permitieron estimar la mineralización aparente en una gama de suelos de la Región Semiárida Pampeana. En promedio, este proceso es muy intenso superando a los suelos de la Pampa Ondulada y aporta un 55% del requerimiento de N de trigo. Los requerimientos de N del cultivo por unidad de grano producido, son también más altos en la Región Semiárida que en la Pampa Ondulada, aunque la diferencia no es grande entre regiones. El modelo de balance desarrollado puede ser usado para estimar dosis de N requeridas por el trigo cuando no hay otras metodologías disponibles. Tiene como limitante que asume respuesta lineal a N y, por lo tanto, no permite evaluaciones económicas de la conveniencia de la fertilización. En casos en que se logren promedios de rendimientos superiores a los usados en el pasado para desarrollar curvas de respuesta a N, este modelo sería una opción para estimar la dosis de fertilizante requerida.

Bibliografía

- Álvarez, R. 1999. Uso de modelos de balance para determinar los requerimientos de fertilizante nitrogenado de trigo y maíz. Editorial EUDEBA. 58 p.
- Álvarez, R., H.S. Steinbach, S.M. Grigera, E. Cartier, G. Obregon, S. Torri, y R. García. 2004. The Balance sheet method as a conceptual framework for nitrogen fertilization of wheat in pampean agroecosystem. *Agron. J.*, 96:1050-1057.
- Álvarez, R y H.S. Steinbach. 2006. Salidas de nitrógeno del agrosistema. En: *Materia orgánica: valor agronómico y dinámica en suelos pampéanos*, Cap. 9. Ed. R. Álvarez. pp. 99-121. Editorial Facultad de Agronomía-UBA, Buenos Aires, Argentina.
- Álvarez, R., P. Prystupa, M. Rodríguez y C. Álvarez. 2013. Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana. Editorial Facultad de Agronomía-UBA, Segunda edición, 652 p.
- Bono, A y R. Álvarez. 2009. Rendimiento de trigo en la región semiárida y subhúmeda pampeana. Un modelo predictivo de la respuesta a la fertilización nitrogenada. *Informaciones Agronómicas IPNI* 41. pp. 18-21.
- Bono, A y R. Álvarez. 2013. Nitrogen mineralization in a coarse soil of the semi-arid Pampas of Argentina. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59:259-272.
- Bremner, J.M. 1965. Inorganic forms of nitrogen. pp 1179-1237. In C.A. Black et al. (Ed.) *Methods of soil analysis*. Part 2. Agron. Monog. 9. ASA, Madison, WI.
- Meisinger, J.J. 1984. Evaluating plant-available nitrogen in soil-crop systems. pp. 391-416. En: *Nitrogen in crop production*. ASA, CSSA and SSSA, Madison, WI.
- Mikha, M.M., C.W. Rice y J.G. Benjamin. 2006. Estimating soil mineralizable nitrogen under different management practices. *Soil Science Society of American Journal*, 70:1522-1531.*