

## Estrategias para alcanzar los máximos rendimientos de maíz: Fertilización y otras prácticas de manejo.

**Dr. Dan Walters**

*University of Nebraska, Lincoln, Nebraska, EE.UU.*

*dwalters@unlnotes.unl.edu*

### Tendencias en Rendimientos de Maíz y uso de Nutrientes

Los sistemas de producción de maíz en monocultivo o rotación con soja bajo riego o en secano son los sistemas predominantes en América del Norte. Alrededor de 30 millones de hectáreas de maíz para grano son cosechadas anualmente en Estados Unidos, de las cuales once estados en el cinturón maicero producen más de 210 millones de toneladas o 35% de la producción global (Dobermann y Cassman, 2002). Durante los pasados 35 años, el rendimiento promedio se ha incrementado linealmente a una tasa de 109 kg ha<sup>-1</sup> por año (Fig. 1). Los rendimientos medios de maíz hoy alcanzan 8.8 ton ha<sup>-1</sup> pero los agricultores progresistas rutinariamente cosechan de 10 a 14 ton ha<sup>-1</sup>.

El promedio de uso de fertilizantes en maíz es de 140 a 155 kg N/ha, 50 kg P/ha y 115 kg K/ha, pero grandes diferencias existen entre estados y entre productores dentro de cada estado (Padgitt et al., 2000). El uso comercial de fertilizantes aumentó significativamente en las décadas de los 60's y 70's, derivado de la adopción de nuevos híbridos de maíz con mayor respuesta y condiciones económicas favorables. Sin embargo, incrementos en los rendimientos de maíz desde 1980 se lograron con la aplicación inicial de fertilizante nitrogenado y la reducción de las dosis de P y K, conduciendo a incrementos significativos en el uso eficiente de nutrientes (kg de rendimiento por kg de nutriente aplicado) de estos macronutrientes (Fig. 1). El prome-

dio de producción por unidad de N aplicado aumentó de alrededor de 42 kg/kg N en 1980 a más de 56 kg/kg N en el 2000. Desde finales de los 70's, los productores de Estados Unidos han estado tomando ventajas del P residual y reservas de K incrementadas por aplicaciones previas (Uri, 1998). El promedio de uso de P se ha reducido a una tasa de 0.6 kg P/ha por año y el promedio de uso de K a 1.8 kg K/ha por año (Dobermann y Cassman, 2002). Las dosis promedio de fertilizantes fosforados empleados por los agricultores en maíz aún exceden la extracción neta de P, pero en años recientes la diferencia se está reduciendo y recientemente han aparecido algunas áreas con balance negativo para P.

Tres factores principales han contribuido probablemente al mejoramiento de rendimientos y eficiencia del uso del fertilizante nitrogenado: 1). Crecimiento vegetal más vigoroso asociado con tolerancia al stress de los híbridos modernos (Duvick y Cassman, 1999; Tollenaar y Lee, 2002); 2). Mejores prácticas de manejo del cultivo (labranza de conservación, calidad de semillas, densidades de población más altas); y 3). Mejores prácticas de manejo de N. Mejoras en el manejo de N incluyen reducciones en aplicaciones de N en el otoño con un cambio hacia aplicaciones en primavera o durante la siembra, mayor uso de aplicaciones múltiples divididas de N en lugar de una sola gran aplicación, y el desarrollo y extensión de recomendaciones de nitrógeno que contabilizan créditos por el uso de estiércol, rotaciones con leguminosas y nitrato residual en el suelo (Shapiro, et al., 2001).

### Potencial de Intensificación para Sistemas con Maíz

¿Podemos estar satisfechos con lo que se ha logrado y será fácil mantener las tasas de crecimiento en el rendimiento obtenidas en el pasado? Los mayores rendimientos de maíz se han reportado en concursos de rendimiento, y los rendimientos ganadores se han usado como una representación para estimar rendimientos potenciales y tendencias de rendimiento potencial (Evans, 1993; Waggoner, 1994). En estados productores de maíz líderes como Iowa y Nebraska, los rendimientos promedio son sólo un 40-50% del rendimiento logrado por ganadores de concursos (Fig. 2). Cual es el rendimiento potencial real permanece como una controversia en virtud de la carencia de datos originados en experimentos de campo bien diseñados en los que los rendimientos de maíz se aproximen a aquellos reportados en los concursos de rendimiento. El mayor rendimiento ganador de maíz bajo riego en Nebraska puede reflejar un rendimiento potencial de grano de 19 ton/ha en ese medio ambiente.

A pesar del progreso logrado en incrementar la eficiencia del uso de N (Fig. 1), datos recientes obtenidos en lotes de producción indican que en promedio, sólo 37% del fertilizante nitrogenado aplicado es asimilado por las plantas de maíz (Cassman et al., 2002). Las eficiencias de recuperación del N aplicado (kg de incremento en acumulación de N en la planta por kg de N aplicado) también son muy variables porque cerca del 80% del

N se aplica antes de la emergencia del cultivo, lo que lo hace muy vulnerable a pérdidas durante la fase del establecimiento del cultivo antes de que las plantas puedan establecer un sistema radicular activo. Sólo 14% de la superficie con maíz recibe aplicaciones de N divididas después de la siembra (Padgitt et al., 2000).

El mejoramiento del rendimiento del cultivo debe continuar siendo sostenido en el siglo 21 para cubrir las necesidades de alimento y fibra del mundo y minimizar la conversión de tierras actualmente destinadas a sistemas naturales hacia la agricultura (Waggoner, 1994; Evans, 1998; Young, 1999). Los rendimientos de maíz deben continuar incrementándose a un promedio de al menos 1% al año para mantener el paso del crecimiento de la población y los cambios de dieta asociados con incrementos de los estándares de vida (Rosegrant et al., 2001; Cassman et al. 2003). Los sistemas agrícolas intensivos globalmente importantes como maíz en monocultivo o la rotación maíz-soja bajo riego o secano presentes en las tierras de la mayor calidad, jugarán un papel determinante en el futuro para sostener el suplemento global de alimentos en virtud de las brechas explotables de rendimiento y uso eficiente de nutrientes.

Las brechas de rendimiento (Fig.

2) no serán cerradas por tecnología genética. Al nivel de establecimiento, las rápidas adopciones de tecnologías genéticas y agronómicas por los productores en el pasado han alimentado los mejoramientos en índices de cosecha y producción de biomasa por unidad de superficie. Sin embargo, el índice de cosecha en muchos cultivos de grano se está aproximando a su límite asintótico natural, haciendo que los futuros mejoramientos en rendimientos de semillas sean substancialmente dependientes en incrementos de biomasa del cultivo. Sistemas Intensivos, con manejo del cultivo y del suelo localmente afinados serán necesarios para lograr mayor potencial de producción de biomasa fuera del cultivo. Existe la necesidad de desarrollar un conocimiento científico integral de la relación entre productividad

de suelos, rendimiento potencial del cultivo, eficiencia en el uso de insumos, lixiviación de N como nitrato, secuestro o fijación de C en suelos, flujos de los gases generados con efectos tipo invernadero en la atmósfera, y uso de energía en sistemas basados en maíz (Cassman, 1999). Un desafío importante es mejorar la predicción de los nutrientes provenientes del suelo, la eficiencia de los fertilizantes, la acumulación de nutrientes en la planta y su efecto en rendimiento en términos absolutos.

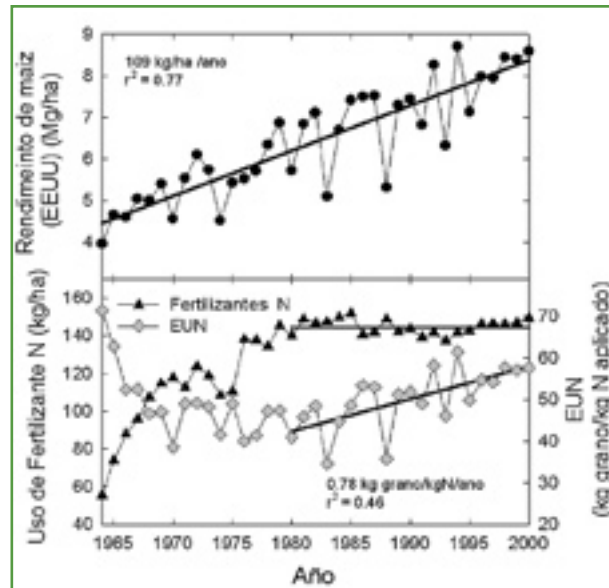


Figura 1. Tendencias en rendimientos de grano, uso de nitrógeno y eficiencia del uso de nitrógeno (EUN) en maíz cultivado en Estados Unidos.

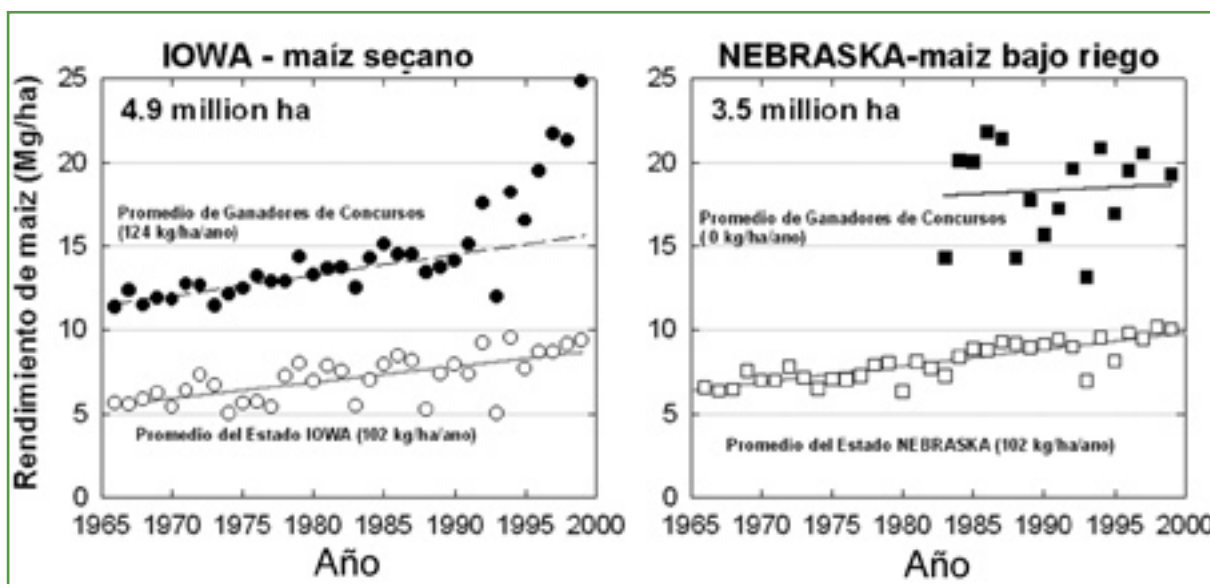


Figura 2. Tendencias en rendimiento promedio de grano y rendimientos logrados por ganadores de concursos de rendimiento en maíz en secano en Iowa y maíz bajo riego en Nebraska.

## El Experimento de Intensificación Ecológica en Lincoln, Nebraska

Un experimento de largo plazo dirigido a estos desafíos y bajo altos rendimientos fue establecido en 1999 en Lincoln, Nebraska. La hipótesis central en este estudio es que los sistemas intensivos basados en maíz pueden ser diseñados para lograr un balance óptimo de productividad, utilidad, uso de energía, y secuestro de C en suelos con mínimas pérdidas de nitrato por lixiviación y emisión de gases tipo invernadero a través de prácticas de manejo mejoradas que logran mayor eficiencia en el uso de insumos con niveles de rendimiento que se aproximan a los techos de rendimiento potencial. Los objetivos específicos de esta investigación son (1) cuantificar el rendimiento potencial de maíz y soja bajo riego y conocer los procesos fisiológicos que lo determinan, (2) identificar prácticas de manejo ambientalmente amigables y de costo efectivo para lograr rendimientos que se acerquen a niveles sostenibles, (3) determinar como los cambios en la calidad de suelos afectan la habilidad para lograr altos rendimientos, (4) cuantificar el potencial de lixiviación de nitrato, la eficiencia del uso de energía, secuestro de C en el suelo y el potencial neto de irradiación forzada de los sistemas intensivos basados en maíz bajo diferente niveles de manejo y (5) desarrollar modelos de simulación mejorados para el cultivo y el ecosistema para una exacta predicción del rendimiento potencial, eficiencia de los nutrientes y potencial de secuestro de carbono (C) bajo diferentes escenarios de manejo.

El experimento se conduce en un suelo profundo con textura franco-limosa (*silt loam*). El promedio inicial de los análisis del suelo a una profundidad de 0-20 cm fueron de pH 5.3, 2.7% de materia orgánica, 67 ppm Bray-P y 350 ppm de K intercambiable. El experimento se conduce bajo parcelas subdivididas (*split-split plots*) con:

Las **rotaciones** de cultivos como parcela mayor

**CC** – maíz continuo

**CS** – maíz-soja

**SC** – soja-maíz

La **densidad de población** (maíz) como la parcela intermedia dividida

**P1** – 74,000 plantas/ha

**P2** – 91,000 plantas/ha

**P3** – 109,000 plantas/ha y

El **manejo de fertilizantes** como la parcela menor subdividida

**M1** - las mejores prácticas de manejo recomendadas basadas en análisis de suelo y meta de rendimiento esperado de 12.5 ton/ha (Shapiro et al., 2001),

**M2** – manejo intensivo apuntando a rendimientos cercanos al rendimiento potencial.

El campo es barbechado en el otoño de cada año para crear una capa de suelo superficial más profunda. El riego ha sido aplicado para cubrir totalmente las pérdidas diarias por evapotranspiración.

De 1999 al 2003, las dosis de N aplicadas a maíz en tratamientos M1 promediaron 130 kg/ha para CS y 190 kg/ha para las rotaciones CC, aplicadas antes de la siembra (50% para CC y 75% para CS) y en el estado V6 el resto del N. Ningún otro nutriente además del N fue aplicado en los tratamientos M1 a ambos cultivos debido a que los resultados del análisis del suelo estaban por encima de los niveles críticos actualmente recomendados de suficiencia. Las dosis de nutrientes en M2 fueron calculadas para una meta de rendimiento de 19 ton/ha y promediaron 250 kg/ha para rotaciones CS y 300 kg/ha para rotaciones CC, aplicados antes de la siembra (30-50%), y en estados vegetativos V6, V10 y VT. En M2, 45 kg P/ha y 85 kg K/ha fueron aplicados a ambos cultivos de soja y maíz.

## Desempeño del Maíz bajo Niveles de Alto Rendimiento

Los niveles de la densidad de población y prácticas de manejo de nutrientes afectaron significativamente el rendimiento, el índice de cosecha, el rendimiento de rastrojo, los componentes de rendimiento y la absorción de nutrientes del maíz. El manejo intensivo de nutrientes (M2) incrementó significativamente el rendimiento durante todos los cinco años (1999-2003), por encima de las mejores prácticas de manejo recomendadas (M1, Tabla 1). El rendimiento promedio de maíz en el tratamiento que representa actualmente a las mejores prácticas de manejo recomendadas (CS-P1-M1) fue de 14.8 ton/ha, 45% mayor que el promedio de rendimiento de maíz bajo riego en Nebraska (10.2 ton/ha) durante el mismo período.

Los máximos rendimientos de grano fueron logrados con el manejo de nutrientes descrito en M2 a densidades de población finales de 91,000 plantas/ha en el 2000 y en el 2003 (P2), o 109,000 plantas/ha en 1999, 2001 y 2002 (P3). Los mayores rendimientos de maíz cultivado después de soja oscilaron de 15.2 a 17.9 ton/ha durante 1999 al 2003 (promedio de 16.1 ton/ha). Esto representa un incremento de hasta el 17.4% sobre el tratamiento CS-P1-M1 o más o menos 50% por encima del promedio de rendimiento actual de las granjas. Curiosamente, los rendimientos del maíz bajo monocultivo (CC) bajo el nivel recomendado de manejo de nutrientes (M1) estuvieron por debajo de aquellos rendimientos obtenidos en la rotación maíz-soja, pero las diferencias de rendimiento observadas se redujeron bajo el manejo de nutrientes M2.

Debido a que el suministro de nutrientes fue minuciosamente afinado para cada una de las dos secuencias de cultivo, los mayores rendimientos obtenidos bajo maíz en monocultivo fueron los mismos a aquellos obtenidos para maíz cultivado después de soja en los ciclos 2001 y 2002 (Tabla 1).

Tabla 1. Tendencias del rendimiento de grano de maíz (15.5 % humedad) en el experimento de Intensificación Ecológica en Lincoln, NE y el efecto de la rotación de cultivos (CC – maíz continuo; CS – maíz-soja), manejo de fertilizantes (M1 – recomendado; M2 – intensivo), y densidad de población (P1 – 74,000 plantas/ha; alta – 91-109,000 plantas/ha). Los tratamientos M2 mostrados se refieren a la densidad de población con el mayor rendimiento (P3 en 1999, 2001 y 2002; P2 en 2000 y 2003).

Densidad	Manejo de Nutrientes	Promedio	Rendimiento en grano				
			1999	2000	2001	2002	2003
Maíz Continuo (CC)			Mg / ha				
P1	M1	<b>13.6</b>	-	13.4	14.0	11.2	16.1
P2/P3	M2	<b>15.5</b>	-	14.4	15.8	15.2	16.6
Maíz – Soja (CS)							
P1	M1	<b>14.6</b>	13.7	14.1	14.4	13.9	16.8
P2/P3	M2	<b>16.1</b>	16.1	15.6	15.6	15.2	17.9

Los consistentes rendimientos de maíz en tratamientos M2 fueron logrados a pesar de una gran variabilidad climática durante 1999 al 2002, que incluyen años con condiciones menos favorables. De los cinco años experimentales, tres (2000-2002) fueron caracterizados por largos períodos de altas temperaturas y sequía. Ambos años 2000 y 2001 fueron cálidos y secos durante Julio y Agosto y los períodos de llenado de grano tuvieron lugar sobre todo en Agosto, cuando el promedio diario de temperatura mínima del aire así como la temperatura del suelo excedieron los niveles normales en 1.3 a 1.9°C. Como resultado, el período de llenado de grano del maíz en el 2000 y 2001 fue más corto que en los años normales. En el 2002, el promedio de temperatura máxima del aire durante todo el período de crecimiento fue 30.9°C, alrededor de 2°C mayor que en los años previos y del promedio de varios años. El promedio de la humedad relativa en el 2002 fue de 59% comparado con 65 a 70% en la mayoría de los años.

Estos impactos climáticos así como la variación en el establecimiento del cultivo y la densidad final de población explican porque la respuesta del cultivo a la densidad de población y a los niveles de manejo de nutrientes, variaron en alguna forma año tras año. Sólo en 1999 y en el 2003, el clima fue similar al típico promedio del sitio, en-

tonces las respuestas del cultivo a la densidad de población y nutrientes fueron expresadas más claramente. Típicamente, el rendimiento de grano, la producción de biomasa de las plantas y la absorción de N, P y K se incrementaron al aumentar la densidad de población y la intensidad de manejo de nutrientes. El aumento en la densidad de población no tuvo un efecto significativo sobre el rendimiento bajo el manejo M1, pero incrementó los rendimientos bajo el nivel M2. La brecha de rendimiento entre M1 y M2 aumentó al incrementar densidad de población (Fig. 3). La intensificación del cultivo para cerrar las brechas de rendimiento existentes probablemente requerirá ambos incrementos en densidad de población y cantidades de nutrientes para explotar las significativas interacciones entre estas dos determinantes de rendimiento.

A través de todos los años, el índice de cosecha del maíz se redujo al incrementar densidad de población debido a la mayor acumulación de biomasa. La producción de rastrojo (tallos, hojas, espigas y centros de mazorcas) se incrementó con ambos, una mayor densidad de población y el manejo de nutrientes. Por ejemplo, promediado por cinco años, el rendimiento de rastrojo fue de 12.8 ton de materia seca/ha en maíz después de soja bajo la densidad de población (P1) y manejo de nutrientes (M1) recomendados actualmente. En contraste, el rendimiento de ras-

trojo bajo la mayor densidad (P3) y manejo intensivo de fertilizantes (M2) promedió 15.0 ton/ha. El tamaño del tejido cosechable en No. de granos/m<sup>2</sup> y peso de 100 semillas fueron 4% mayores en tratamientos M2 que en M1, pero disminuyeron al incrementar la densidad de población. El peso de grano de mazorcas individuales disminuyó al aumentar la densidad de población en ambos tratamientos M1 y M2, pero las mazorcas en M2 fueron consistentemente más grandes que aquellas producidas bajo M1, demostrando la importancia de un adecuado suplemento de nutrientes para el llenado de grano bajo niveles de alto rendimiento (Fig. 4).

### Requerimientos de Nutrientes del Maíz

Altas densidades de población y manejo intensivo de nutrientes resultaron en mayores acumulaciones de N y K por unidad de rendimiento de grano, mientras que no se observaron diferencias para P, Ca, Mg y S (Tabla 2). La acumulación promedio de nitrógeno en biomasa aérea fue de 17.5 kg N/ton de rendimiento en el tratamiento de manejo recomendado (CS – P1 – M1), pero se incrementó a 19.6 kg N/ton bajo el manejo CS – P2 – M2. Similarmen-te, el promedio de acumulación de potasio en tejido aéreo aumentó de 22.5 kg K/ton a 26.8 kg K/ton. En contraste, la remoción de nutrientes contenidos sólo en el grano no

fue significativamente diferente entre los niveles de manejo de nutrientes y densidades de población, excepto por una ligera reducción en la remoción de N presente en el grano bajo el régimen de manejo de nutrientes M1 (Tabla 2).

Los números medidos de la absorción total de nutrientes por unidad de rendimiento mostrados en la Tabla 2 se comparan con los requerimientos de nutrientes óptimos simulados para un rendimiento cercano al potencial. A medida que los rendimientos se acercan al techo potencial, los requerimientos

internos de nutrientes en la planta aumentan para sostener las funciones fisiológicas de una mayor cantidad de biomasa aérea (Witt et al., 1999). Esto es particularmente cierto en nutrientes como potasio, que realiza ambas funciones específicas y no específicas en la planta y puede ser almacenado en grandes cantidades en las vacuolas de la célula. En el futuro, la investigación debe clarificar cuales son las necesidades reales de K del cultivo para alcanzar el rendimiento potencial y si el aumento en la absorción de K es debida a la absorción pasiva

de iones de  $K^+$  con el flujo de transpiración, la cual puede resultar de un aumento de la competencia bajo condiciones de alto rendimiento o del stress generado por las altas temperaturas en algunos años.

## Eficiencia del Uso del Nitrógeno

Las dosis de aplicación de nitrógeno en este estudio fueron ajustadas en función del rendimiento potencial proyectado, del cultivo anterior y del  $NO_3-N$  residual de primavera (Tabla 3). Las dosis de aplicación de N han permanecido sin cambios para la rotación maíz-soja debido en parte al impacto de la soja sobre la reducción de  $NO_3-N$  residual. A principios del 2002, iniciamos con la práctica de aplicar 50 – 70 kg N/ha al residuo de maíz en el tratamiento de maíz continuo bajo manejo M2 antes del barbecho de otoño. Esto tiene el propósito de facilitar la descomposición y humificación de las altas cantidades de residuos que hemos obtenido con este tratamiento con el intento de reducir la competencia por N con los organismos del suelo durante las primeras etapas de la estación de crecimiento. El impacto de estos cambios de manejo sobre la eficiencia del uso de nitrógeno (EUN) se muestra en la Tabla 4. El promedio de la eficiencia del uso de N (EUN) definido como la cantidad de grano producido por unidad de fertilizante nitrogenado aplicado varió entre los sistemas de cultivo. En la mejor práctica de manejo recomendada (CS – P1 – M1), EUN en maíz promedió 114 kg de grano por kilogramo de N aplicado comparado al promedio de EUN observado en los campos de los agricultores de cerca de 58 kg/kg N. La eficiencia del uso de N disminuyó a 65 kg/kg N en el tratamiento intensivo CS – P2/3 – M2, pero permaneció por encima de los niveles de los productores. En el tratamiento CC – P2/3 – M2, sin embargo, EUN fue ligeramente menor a 53 kg/kg N, indicando que el manejo de N no fue aún lo suficientemente definido para lograr una adecuada congruencia entre la dinámica de suplemento de N y la demanda de N por el cultivo. A pesar de que el promedio de EUN para el tratamiento CC – M2 esta por debajo de este nivel, hemos

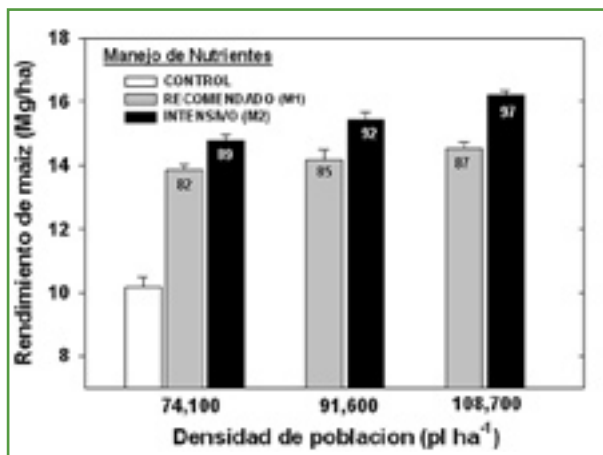


Figura 3. Efecto de la densidad de población final (P1 – 74,000; P2 – 91,000; P3 – 109,000 plantas/ha) y manejo (M1 – recomendado; M2 – intensivo) sobre el rendimiento de maíz en 1999. Los números dentro las barras son los rendimientos actuales expresados como porcentaje del rendimiento potencial simulado del cultivo bajo la densidad de población P3 (Modelo de simulación: “Hybrid-Maize”, Yang et al. 2004)

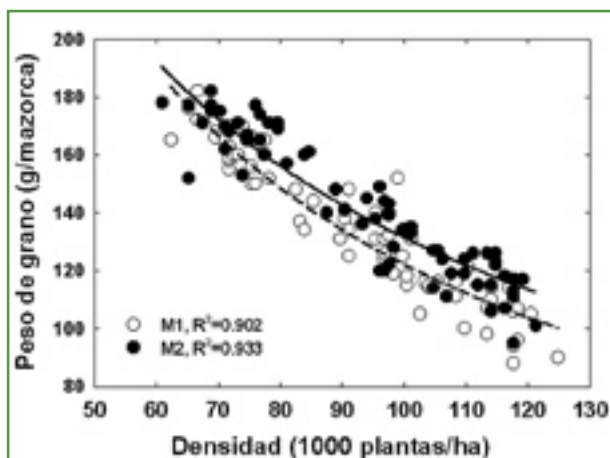


Figura 4. Efecto de la densidad de población y manejo de nutrientes (M1 – manejo de nutrientes recomendado; M2 – manejo de nutrientes intensivo) sobre el peso de grano por mazorca.

Tabla 2. Efecto de la rotación de cultivos, manejo de nutrientes y densidad de población sobre la acumulación de nutrientes en la planta y la remoción de nutrientes en el grano por unidad de rendimiento de grano.

	Promedio 1999-2002									
	Rendimiento en grano	Absorción total de nutrientes en biomasa aérea				Remoción de nutrientes en el grano				
	Mg/ha	N	P	K	S	N	P	K	S	
		kg / Mg grano								
CC-PI-MI	13.1	<b>17.5</b>	3.5	<b>22.5</b>	2.0	11.2	2.7	3.4	1.1	
<b>CC-P3-M2</b>	15.0	<b>20.0</b>	3.3	<b>29.0</b>	2.0	12.1	2.6	3.3	0.9	
<b>CS-PI-MI</b>	13.9	<b>18.2</b>	3.4	<b>22.7</b>	2.0	12.1	2.7	3.3	1.1	
<b>CS-P3-M2</b>	15.3	<b>19.6</b>	3.4	<b>26.8</b>	2.0	12.0	2.7	3.3	0.9	

Tabla 3. Historia de la aplicación de fertilizante nitrogenado a maíz bajo monocultivo (CC) y maíz después de soja (CS) en los tratamientos de manejo de fertilizantes M1 (recomendado) y M2 (intensivo).

Manejo de Nutrientes	Promedio	Dosis de Nitrogeno (kg N / ha)				
		1999	2000	2001	2002	2003
Maíz Continuo (CC)						
M1	<b>190</b>	-	200	180	180	180
M2	<b>300</b>	-	363	300	289	250
Maíz – Soja (CS)						
M1	<b>130</b>	130	138	130	120	130
M2	<b>251</b>	225	298	240	216	250

M1: N aplicado antes de la siembra (50%) y estado vegetativo V6

M2: N aplicado antes de la siembra (50%) y en estados vegetativos V6, V10 y VT

CC-M2: incluye aplicación de 70 (2002) y 50 (2003) kg N/ha al residuo de maíz antes del barbecho de otoño.

Tabla 4. Eficiencia del uso del nitrógeno del maíz expresada en Mg de rendimiento por kilogramo de N aplicado

Densidad	Manejo de Nutrientes	Promedio 1999-2003			EUN 1999 – 2003				
		Dosis de N	Rendimiento en grano	EUN	1999	2000	2001	2002	2003
		kg/ha	Mg/ha	kg/kg	kg grano / kg N				
Maíz Continuo (CC)									
PI	M1	190	13.6	<b>72</b>	-	66	70	62	89
P2/3	M2	300	15.5	<b>53</b>	-	40	53	53	67
Maíz – Soja (CS)									
PI	M1	130	14.6	<b>114</b>	106	102	111	116	129
P2/3	M2	251	16.1	<b>65</b>	72	52	65	71	72

experimentado un constante incremento de EUN en el curso del estudio. Esto indica el potencial que existe para incrementar EUN en sistemas a base de maíz.

Nuestra hipótesis es que el au-

mento en EUN que hemos observado es debido al mejoramiento en ambos, la calidad del suelo derivada de mayores adiciones de C al suelo y el correspondiente secuestro de N con este carbono.

### Cambios en la Calidad del Suelo Bajo Manejo Intensivo

Los sistemas de producción de maíz pueden contribuir a resolver problemas ambientales en lugar de

ser percibidos como la fuente de esos problemas. Un ejemplo es el potencial de los sistemas de maíz para fijar dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la biomasa del cultivo a través del proceso de la fotosíntesis, y secuestrar una porción de este C fijado en la materia orgánica del suelo. El efecto acumulado del C y N en los residuos del cultivo en estos sistemas se resume en la Figura 5.

A lo largo de un período de cuatro años (1999-2002), 16.8 Mg C/ha fueron reciclados en el tratamiento recomendado CS-PI-M1 el cual es el sistema de rotación más común en la faja del maíz en Estados Unidos. Esta cantidad aumentó a 20.4 Mg C/ha en el sistema intensivo de

manejo maíz-soja (CS-P3-M2). La cantidad neta de C reciclado en todos los tratamientos bajo maíz continuo (CC) fue mayor que en cualquiera de los tratamientos bajo la rotación maíz-soja (CS), alcanzando 20.8 Mg C/ha en CC-PI-M1 y un máximo de 26.2 Mg C/ha en CC-P3-M2. Esto representa un incremento del 48% en adiciones de C al suelo a través de residuos a lo largo de este período de cuatro años. El nitrógeno reciclado en los residuos de cosecha fue mayor en la rotación maíz-soja con un promedio de 538 kg N/ha en comparación a 400 kg N/ha del tratamiento de maíz monocultivo. Los mayores adiciones de C al suelo sólo pueden aumentar

el contenido de materia orgánica si no existen pérdidas elevadas de  $\text{CO}_2\text{-C}$  de la respiración del suelo. Hemos monitoreado la respiración de  $\text{CO}_2\text{-C}$  del suelo desde 1999 y hemos notado que los tratamientos de fertilidad han tenido un impacto menor en pérdidas de  $\text{CO}_2\text{-C}$ . La Figura 6 muestra las pérdidas de  $\text{CO}_2\text{-C}$  durante la estación de crecimiento del 2003. A pesar de que las pérdidas fueron mayores para CC (debido a la mayor adición de C en residuos) el manejo de fertilidad no resultó en pérdidas de  $\text{CO}_2\text{-C}$  equivalentes a adiciones de C. Esto sugiere que deben resultar en incrementos en el contenido de C y N en el suelo.

Figura 5. Efecto de la rotación de cultivos, densidad de población y manejo de nutrientes sobre las adiciones acumuladas de carbono y nitrógeno en el suelo a través de los residuos aéreos de la planta durante un período de cuatro años (1999-2002).

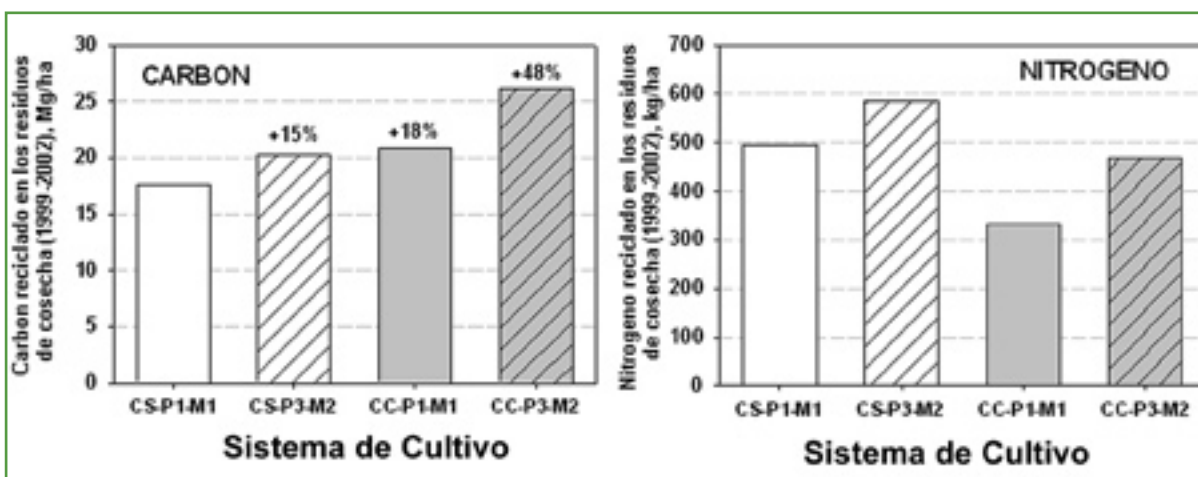
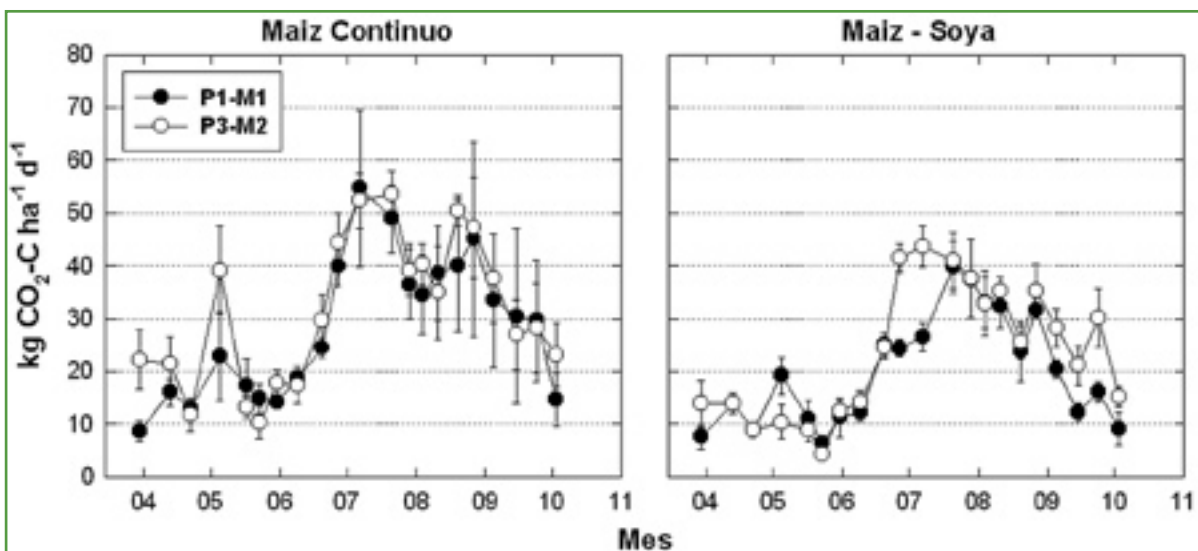


Figura 6. Emisiones de  $\text{CO}_2\text{-C}$  en el 2003. Emisiones acumuladas durante la estación de crecimiento: CC-PI-M1 5200 kg C/ha; CS-PI-M1 3600 kg C/ha; CC-P3-M2 5600 kg C/ha; y CS-P3-M2 4200 kg C/ha.



La Figura 7 muestra el cambio en ambos, C y N en el suelo entre el período del 06/2000 al 06/2003. Ambos, C y N en el suelo han aumentado durante este período y el C en el suelo ha aumentado en mayor magnitud en la rotación maíz-soja relativo al tratamiento CC-P1-M1. Esto es seguramente debido a la mayor cantidad de adiciones de N en los residuos de soja en la rotación y al impacto que esto tiene en la creación de humus estable. Los mayores incrementos de C y N en el suelo a lo largo de este período han sido observados en el sistema de maíz en monocultivo bajo altas densidades de población y manejo intensivo de fertilizantes. La estabilización del N en el suelo en este sistema ha resultado seguramente en un aumento en el suministro de N de fuentes nativas del suelo y una mejor sincronía del suministro de N durante el período de crecimiento. Esto ha sido probablemente un factor principal en el incremento de EUN que hemos observado en los pasados cinco años. Estudios sobre la naturaleza de los cambios en fracciones de la materia orgánica del suelo y los procesos de humificación y mineralización del N de estas fracciones se están llevando a cabo en la actualidad.

### Conclusiones

Rendimientos promedio que se aproximan al 80% del rendimiento

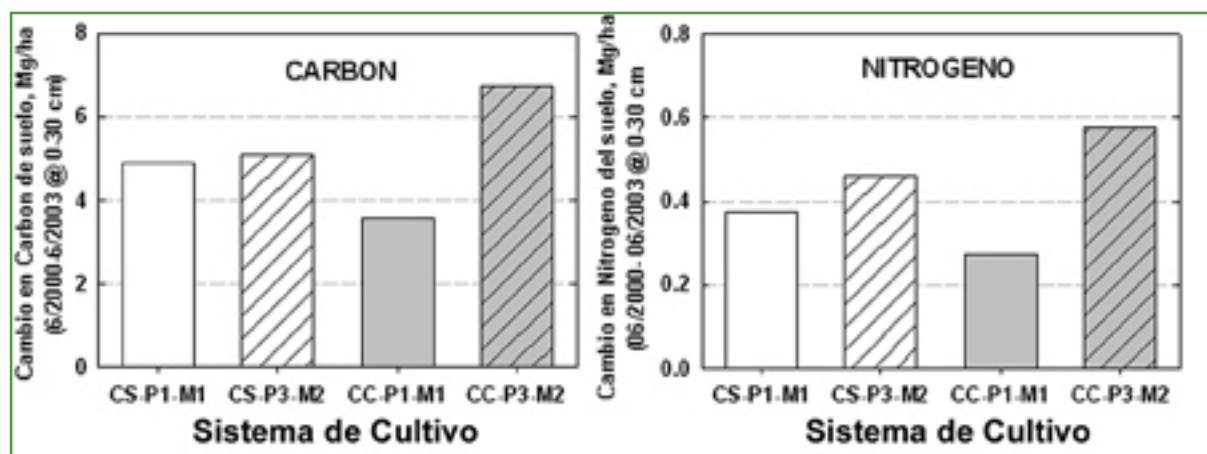
potencial para maíz se han logrado rutinariamente en el proyecto de Intensificación Ecológica en Lincoln, NE. Comparados con las recomendaciones actuales, altos rendimientos en maíz requieren altas densidades de población (75,000 – 88,000 plantas/ha) y mayor absorción de N y K por unidad de rendimiento. Enfoques de manejo de N más dinámicos y en tiempo real también se requieren para mejorar la congruencia del suministro de N y demanda del cultivo, evitando la acumulación de nitratos residuales en el suelo y los altos picos de emisiones de N<sub>2</sub>O bajo manejo intensivo. El tratamiento de manejo intensivo de nutrientes (M2) ha mostrado estabilidad de altos rendimientos en años con grandes variaciones climáticas, generalmente rindiendo más del 80% del potencial de rendimiento genético-climático simulado para este sitio en cada año. Los sistemas de producción intensificados son probablemente sostenibles en el largo plazo debido a que el incremento en la producción de biomasa conducirá a incrementos en las adiciones de residuos y muy probablemente, a incrementos significativos en el contenido de materia orgánica del suelo en el tiempo. Datos preliminares indican que estos esquemas de manejo no parecen causar un aumento en las emisiones superficiales de CO<sub>2</sub> del suelo, que compensarían su mayor

potencial de secuestro de carbono en el suelo. Sin embargo, esfuerzos para incrementar las cantidades de carbono secuestrado a través de altas aplicaciones de N pueden conducir a otros problemas como incrementos en las emisiones de N<sub>2</sub>O, las cuales deben ser reducidas a través de formas de manejo de N más detalladas. Hemos observado una tendencia hacia el mejoramiento de la eficiencia del uso del fertilizante nitrogenado la cual, en parte, es debida a una ganancia en el almacenamiento C y N como resultado de un manejo intensivo. El mejoramiento de la calidad del suelo y las mayores adiciones de residuos de cosecha bajo manejo intensivo deberían hacer esta tarea más fácil con el tiempo.

### Referencia

- Cassman, K.G.** 1999. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. Proc. Natl. Academy of Science 96:5952-5959.
- Cassman, K.G., A. Dobermann, and D.T. Walters.** 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. Ambio 31:132-140.
- Cassman, K. G., A. Dobermann, D.T. Walters and H. Yang.** 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environ-

Figura 7. Efecto de la rotación de cultivos, densidad de población y manejo de nutrientes sobre los cambios en el contenido de carbono y nitrógeno en la capa superficial de 30 cm del suelo en muestras tomadas en 06/2000 y 06/2003.



mental quality. *Annu. Rev. Environ. and Resour.* 28:315-58.

**Dobermann, A., and K.G. Cassman.** 2002. Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia. *Plant Soil* 247:153-175.

**Duvick, D.N., and K.G. Cassman.** 1999. Post-green revolution trends in yield potential of temperate maize in the North-Central United States. *Crop Sci.* 39:1622-1630.

**Evans, L.T.** 1993. *Crop evolution, adaptation, and yield.* Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Evans, L.T. 1998. *Feeding the ten billion: Plants and population growth.* Cambridge University Press, New York.

**Padgitt, M., D. Newton, R. Penn, and C. Sandretto.** 2000. *Production practices for major crops in U.S. agriculture, 1990-97.*

Statistical bulletin no. 969. USDA, ERS, Washington,

**Rosegrant, M.W., M.S. Paisner, S. Meijer, and J. Witcover.** 2001. *Global food projections to 2020: Emerging trends and alternative futures.* IFPRI, Washington, D.C.

**Shapiro, C.A., R.B. Ferguson, G.W. Hergert, A. Dobermann, and C.S. Wortmann.** 2001. *Fertilizer suggestions for corn.* NebGuide G74-174-A. Univ. of Nebraska Coop. Ext. Service, Lincoln, NE.

**Tollenaar, M., and E.A. Lee.** 2002. Yield potential, yield stability, and stress tolerance in maize. *Field Crops Res.* 75:161-169.

**Uri, N.D.** 1998. Environmental considerations in the fertilizer use decision. *Environ. Geol.* 34: 103-110.

**Waggoner, P.E.** 1994. How much land can ten billion people spare for nature? Task Force Report No. 121.

Council for Agri. Science and Technology, Ames, IA.

**Witt, C., A. Dobermann, S. Abdulrachman, H.C. Gines, G.H. Wang, R. Nagarajan, S. Satawathananont, T.T. Son, P.S. Tan, L.V. Tiem, G.C. Simbahan and D.C. Olk.** 1999. Internal nutrient efficiencies of irrigated lowland rice in tropical and subtropical Asia. *Field Crops Res.* 63:113-138.

**Yang, H.S., A. Dobermann, J.L. Lindquist, D.T. Walters, T. Arkebauer, and K.G. Cassman.** 2004. *Hybrid Maize - A maize simulation model that combines two crop modeling approaches.* *Field Crops Res.* In Press.

**Young, A.** 1999. Is there really spare land? A critique of estimates of available cultivable land in developing countries. *Environment, Develop. and Sustainability* 1:3-18. ■