

# EFICIENCIA FISIOLÓGICA DE USO DE NITRÓGENO POR CULTIVOS ANUALES EN FUTURA AGRICULTURA SUSTENTABLE<sup>1</sup>

## Physiological nitrogen use efficiency in annual crops for sustainable agriculture

Juan Luis Rouanet M.<sup>2</sup>

### S U M M A R Y

The characterization of the physiological nitrogen use efficiency (PNUE) of wheat cultivars and maize hybrids growing under different N-fertilizer rates and N-sources was determined. At low nitrogen fertilizer supply, the wheat cultivars and maize hybrids evaluated produced grain with the highest physiological N use efficiency, 54-80 kg and 60-72 kg of grain per kg of nitrogen absorbed, respectively. Under the highest N-fertilizer applications, PNUE was the lowest, 25-31 and 20-30 kg of grain per kg of nitrogen absorbed for wheat and maize respectively.

PNUE showed higher sensitivity than agronomic and recovery N use efficiency to sample genotypic and/or environmental effect. Wheat demonstrated genotypic effects in their PNUE responses, whereas maize hybrids demonstrated genotypic and environmental effects in their PNUE responses.

Some of these highest PNUE values were presented along with higher grain yield which must be seen as a possibility to select N-efficient material adapted to sustainable agriculture. The present work relies on one of the concept of sustainable agriculture, which takes into account the general input-output ratio achieved in terms of improved use efficiency of nutrients by crops.

**Key words:** wheat, maize, nitrogen use efficiency, agronomic N use efficiency, recovery N efficiency, physiological N use efficiency, sustainable agriculture, cropping system, harvest index.

### INTRODUCCION

A través del tiempo se ha podido constatar notablemente que los actuales sistemas de producción, para una gran parte de los cultivos anuales, no son económica ni tecnológicamente sustentables, dados los estrechos márgenes de comercialización, y un creciente deterioro del recurso suelo. La alteración de un adecuado balance nutricional y un deterioro químico y físico de las propiedades del suelo, atribuido a un uso intensivo del recurso en la producción, está conduciendo, como consecuencia, a un aumento en la dependencia de insumo de energía para mantener estable la productividad agrícola, al mismo tiempo que los recursos energéticos aumentan en costo y decrecen en disponibilidad (Stout, 1990). Una solución a estos procesos es alterar los actuales sistemas de producción con medidas, entre otras, la de disminuir el uso de nitrógeno fertilizante y su reemplazo por fuentes orgánicas, con el fin de reducir los costos de fertilización y proteger el recurso suelo, una de las muchas características

del esquema de agricultura sustentable. La interrogante que debe manejarse, entonces, a nivel de fitomejoramiento y manejo de cultivos, es si los actuales genotipos en uso poseen una respuesta diferente en la eficiencia de uso del nitrógeno cuando crecen, ya sea en condiciones de reducidas cantidades agregadas de nitrógeno fertilizante o en el nuevo ambiente nitrogenado impuesto por los sistemas de cultivos sustentables en proposición, cuyo nitrógeno proviene de fuentes orgánicas. Si este material genético responde en forma diferente, se plantea también la búsqueda de un criterio o característica productiva de la planta que haga posible identificar material a producir y recomendarlo para una futura y cercana agricultura sustentable.

La cantidad de nitrógeno (N) extraída por las plantas representa la disponibilidad de este nutriente en un sistema suelo-cultivo particular, y su uso en la producción de grano está estrechamente relacionado con su constitución genética para ser absorbido, asimilado y redistribuido en la planta y en el ciclo general del mismo (Loomis y Connors, 1992). Aunque el rendimiento de cultivos de cereales se expresa, comúnmente, en producción de grano por unidad de superficie de suelo, al depender de variados insumos, puede ser también expresado en

<sup>1</sup>Recepción de originales: 21 de diciembre de 1993.

<sup>2</sup>Estación Experimental Carillanca (INIA), Casilla 58-D, Temuco, Chile.

términos equivalentes de cualquiera de ellos. A futuro, puede ser más interesante ser expresado por unidad de agua, nitrógeno o fósforo. La mejor relación a usar, cuya expresión es una medida de eficiencia, dependerá del recurso que es más limitante o más necesario conservar (Evans, 1980).

El objetivo de esta análisis fue caracterizar la habilidad en producir grano por unidad de N absorbido, o eficiencia fisiológica de uso de N (EFN), en plantas de trigo (*Triticum aestivum* L.) y maíz (*Zea mays* L.) en diversas condiciones de campo. Se comparó la variación en EFN para diferentes genotipos de trigo con distintas dosis de N-fertilizante agregado y para diferentes híbridos de maíz, bajo sistemas alternativos de producción, que difirieron en la dosis de N-fertilizante adicionado y abastecimiento extra de N proveniente de fuentes orgánicas, situación de manejo que se prevé en un futuro esquema de agricultura sustentable.

### MATERIALES Y METODOS

Los datos de rendimiento en grano de trigo y contenido de nitrógeno total, fueron obtenidos de experimentos establecidos para medir EFN en variedades nuevas y antiguas, realizados en el campo experimental de la Estación Experimental Carillanca (38° 42' lat. S, 73° 20' long. W, Temuco, Chile), durante las temporadas agrícolas 1988 y 1989. Cada experimento se localizó sobre un suelo Andisol de la Serie Vilcún (Entic Dystrandep), textura franco arcillo limosa de una profundidad de enraizamiento de 90 cm; siendo el pre-cultivo para cada experimento, avena para grano. El diseño experimental usado fue de parcelas divididas, correspondiendo la parcela principal a las variedades y las sub-parcelas a las dosis de nitrógeno. Las variedades fueron: Vilmorín 29 (V<sub>1</sub>) (variedad "tradicional" creada en la década del 40), y Cunco (V<sub>2</sub>), Perquenco (V<sub>3</sub>), Talafén (V<sub>4</sub>) y Lanco (V<sub>5</sub>), estas cuatro últimas agrupadas bajo el nombre de "Resto" para el análisis de datos, o variedades nuevas, y que fueron creadas por fitomejoramiento en el período 1970-1980. Las dosis utilizadas fueron 0, 80, 160, 320 y 640 kg ha<sup>-1</sup> de N, aplicado a la forma de salitre sódico, en tres parcialidades iguales: 33% a siembra, al estado 23 y al estado 41, respectivamente, según Zadok, Chang y Konzak (1974). El fósforo y potasio fue aplicado como base común a los experimentos en dosis de 131 kg ha<sup>-1</sup> de P como superfosfato triple y 41 kg ha<sup>-1</sup> de K como sulfato de potasio a la siembra. Los ensayos fueron manejados con control químico de enfermedades y malezas, no presentándose problemas fitosanitarios. Tanto la variedad Vilmorín 29 como el resto de ellas, no presentaron tenedura en los experimentos bajo ninguno de los tratamientos

adición de N-fertilizante. La época de siembra para ambas temporadas fue junio.

Los datos de rendimiento y contenido de nitrógeno total para maíz, fueron obtenidos de ensayos pertenecientes a LISA (Low Input Sustainable Agriculture), ejecutados por la Universidad de Cornell, en sus programas de rizobotánica y mejoramiento de maíz, durante las temporadas 1991 y 1992. Se muestreó plantas de los ensayos de adaptación de híbridos de maíz a sistemas de agricultura sustentables, realizados en dos localidades; en Aurora, Estación Experimental Robert Musgrave (42° 45' lat. N, 76° 35' long. W), en un suelo de la Serie Kendaia-Lima (Glossoboric Hapludalfs), franco limoso y en la localidad de Big Flats, Estación Experimental del United States Department of Agriculture/ Soil Conservation Service (USDA/SCS) (42° 30' lat. N, 76° 15' long. W), sobre un suelo de la Serie Unadilla (Typic Dystrochepts, mesic) franco limoso, ambas en el estado de Nueva York, EE.UU.

El diseño experimental consistió en parcelas divididas, correspondiendo la parcela principal a los sistemas de cultivo y las subparcelas a los híbridos de maíz (Cornell 281, Cargill 4327 y Pioneer 3751), con cinco repeticiones. Los sistemas de cultivo o tratamientos usados en el estudio, que representan dosis de N-fertilizante agregado, fueron: convencional, cultivo intercalado y bajo nitrógeno.

El "sistema convencional" consistió en inversión de suelo (rastra) y arado cincel, más 168 kg ha<sup>-1</sup> de N como fertilizante (nitrato de amonio), 28 kg ha<sup>-1</sup> a la siembra y 140 kg ha<sup>-1</sup> al estado V<sub>6</sub>, según Ritchie y Hanway (1973). El "sistema cultivo intercalado", por su parte, consistió en laboreo similar al convencional, donde la siembra de maíz se realizó sobre el rastrojo incorporado de trébol rosado de un año, más 28 kg ha<sup>-1</sup> de N como nitrato de amonio al estado V<sub>6</sub> de desarrollo de las plantas de maíz. El trébol rosado se sembró cada año con la última labor de limpia mecánica de la entrelínea del cultivo de maíz, estado V<sub>6</sub>-V<sub>8</sub>, con una dosis de semilla de 13 kg ha<sup>-1</sup>, y fue utilizado como abono verde y cultivo cobertor. El "sistema bajo nitrógeno" consistió de la misma preparación de suelo que los otros dos sistemas, con una adición de 28 kg ha<sup>-1</sup> de N, aplicado como fertilizante químico (nitrato de amonio) al estado V<sub>6</sub> de desarrollo de las plantas. Como base a todos los tratamientos se aplicó 26 kg de P y 50 de K por hectárea al momento de la siembra del maíz. El control de malezas para todos los sistemas, excepto el "cultivo intercalado", consistió en la aplicación de glifosato, previo a la siembra del maíz y la mezcla alaclor + cianazina de pre-emergencia. En el "cultivo intercalado", la maleza fue controlada en la entrelínea, mecánica-

mente, dos veces, previo a la siembra del trébol rosado, y con una aplicación en banda sobre la hilera de una mezcla de alaclor + dicamba.

Para trigo y maíz se determinó el índice de cosecha (IC):

$$IC = GRHA/FTHA;$$

donde:

GRHA = rendimiento en grano (qqm ha<sup>-1</sup> para trigo y ton ha<sup>-1</sup>, para maíz).

FTHA = fitomasa total (ton ha<sup>-1</sup>).

El contenido de N total en trigo, maíz y trébol rosado se obtuvo de muestras de plantas secadas a 70 °C, por 48 horas, mediante el método de digestión y destilación Kjeldahl. Los resultados del análisis químico (%), y su producto por fitomasa total, originaron el contenido de N total en la parte aérea sin considerar raíces (N total, kg ha<sup>-1</sup>) para cada especie.

La EFN fue expresada como el cociente entre rendimiento de grano y N total a través de:

$$EFN = \frac{\text{kg grano en tratamiento dosis N} - \text{kg grano en tratamiento testigo}}{\text{kg N absorbido en tratamientos dosis N} - \text{kg N absorbido en tratamiento testigo para trigo, según Bock (1984); Pino (1979); Van Keulen (1977); y}}$$

$$EFN = \frac{\text{kg grano en tratamiento dosis N (sistema cultivo)}}{\text{kg N absorbido en tratamiento dosis N (sistema cultivo) para maíz, en ausencia de tratamiento testigo absoluto, según Anderson, Kamprath y Moll, 1984; Bock, 1984; Moll, Kamprath y Jackson, 1982.}}$$

También para trigo y maíz se determinó la eficiencia de recuperación de N (ERN):

$$ERN = N \text{ total}/NFA$$

donde:

NFA = N fertilizante aplicado (kg ha<sup>-1</sup>).

Las eficiencias de uso fisiológica y de recuperación del N se relacionaron entre sí, explicando la eficiencia agronómica o global de uso de N (EAN), mediante la siguiente fórmula:

$$EAN = EFN \times ERN (1);$$

criterio común de selección a nivel de mejoramiento y manejo de cultivos (Novoa y Loomis, 1981, Moll y otros, 1982, Isfan, 1993).

El análisis de datos fue realizado mediante un ANDEVA con un modelo de parcelas divididas. La suma de cuadrados de las interacciones fueron analizadas por el método de contrastes ortogonales, para trigo (Gómez y Gómez, 1976) y por el método AMMI para maíz (Zobel, Wright y Gauch, 1988). Se aplicó para ambos grupos de ensayo una prueba de separación de medias, Prueba de Duncan y diferencia mínima significativa (DMS), respectivamente. Los tratamientos se consideraron de efecto significativo en todos los análisis estadísticos para  $P \leq 0,05$ .

## RESULTADOS

### Rendimiento, fitomasa e índice de cosecha

Un análisis general de las variaciones de rendimiento a aumentos de N-fertilizante, indica una respuesta de tipo cuadrática, para el trigo, con un componente lineal significativo en el rango de dosis 0-160 kg ha<sup>-1</sup> de N, en ambas temporadas (cuadros 1 y 2). La interacción significativa var. x N, indica diferencias en las respuestas en rendimiento entre variedades a los niveles de N agregado como fertilizante. La partición de suma de cuadrados de la interacción, en el contraste variedad Vilmorín 29 vs. Resto, y su significancia, explica que la existencia de esta interacción es debido a la diferencia entre la variedad tradicional y Resto (cuadros 1 y 2). Dentro de Resto, las variedades presentan una respuesta similar entre ellas para cada temporada (Cuadro 3). En adición, un análisis combinado de las dos temporadas (datos no publicados), en el cual no se observó efecto año sobre los índices fitométricos elegidos, demostró que Vilmorín 29 (que representa una variedad tradicional), posee una respuesta diferente a Cunco, Lanco, Perquenco y Talafén, sembradas en junio. A su vez, la variedad Perquenco obtuvo rendimientos significativamente mayores a las demás variedades (Cuadro 4).

En cuanto a la producción de fitomasa total, ésta no presentó diferencias significativas entre variedades (cuadros 1 y 2), pero sí el nitrógeno influyó positiva y significativamente esta producción. Por otra parte, tampoco existió diferencias entre producción de fitomasa en cada variedad, cuando se incrementó el N (cuadros 1, 2 y 4).

**CUADRO 1. Cuadrados medios para rendimiento, fitomasa e índice de cosecha en ANDEVA para cinco variedades de trigo, bajo diferentes dosis de N-fertilizante. Estación Experimental Carillanca, IX Región, 1988**

**TABLE 1. Mean squares for yield, phytomass and harvest index in ANOVA for five wheat cultivars under different fertilizer N rates. Experimental Station Carillanca, IX Región, 1988**

	Rendimiento	Fitomasa	IC
Variedad	599,05**	N.S.	0,016**
Tradicional vs. Resto	1.802,76*	N.S.	0,041**
V <sub>2</sub> vs. V <sub>3</sub>	N.S.	N.S.	0,016**
V <sub>4</sub> vs. V <sub>5</sub>	N.S.	N.S.	N.S.
V <sub>2</sub> + V <sub>3</sub> vs. V <sub>4</sub> + V <sub>5</sub>	N.S.	N.S.	N.S.
Error (a)	214,05	11,35	0,0030
Nitrógeno	5.829,39**	363,00**	0,006**
Nitrógeno lineal (NL)	6.604,69**	526,64**	N.S.
Nitrógeno cuadrático (NQ)	11.255,37**	622,31**	N.S.
Variedad x N	145,24**	N.S.	0,006**
Tradicional vs. Resto x NL	766,88**	N.S.	0,02**
Tradicional vs. Resto x NQ	208,95**	N.S.	0,008*
V <sub>2</sub> vs. V <sub>3</sub> x NL	N.S.	N.S.	N.S.
V <sub>2</sub> vs. V <sub>3</sub> x NQ	N.S.	N.S.	N.S.
V <sub>2</sub> + V <sub>3</sub> vs. V <sub>4</sub> + V <sub>5</sub> x NL	N.S.	N.S.	N.S.
V <sub>2</sub> + V <sub>3</sub> vs. V <sub>4</sub> + V <sub>5</sub> x NQ	N.S.	N.S.	N.S.
V <sub>4</sub> vs. V <sub>5</sub> x NL	N.S.	N.S.	N.S.
V <sub>4</sub> vs. V <sub>5</sub> x NQ	N.S.	22,52	0,023*
Error (b)	66,30	2,16	0,001
C.V. (%)	16,08	11,30	9,60

\*, \*\*: valores significativos  $P \leq 0,01$  y  $P \leq 0,05$ , respectivamente, N.S.: nivel de probabilidad  $P > 0,05$ .

**CUADRO 2. Cuadrados medios para rendimiento, fitomasa e índice de cosecha en ANDEVA para cinco variedades de trigo, bajo diferentes dosis de N-fertilizante. Estación Experimental Carillanca, IX Región, 1989**

**TABLE 2. Mean squares for yield, phytomass and harvest index in ANOVA for five wheat cultivars under different fertilizer N rates. Experimental Station Carillanca, IX Región, 1989**

	Rendimiento	Fitomasa	IC
Variedad	243,44**	N.S.	0,018**
Tradicional vs. Resto	204,18*	N.S.	0,018**
V <sub>2</sub> vs. V <sub>3</sub>	570,62*	N.S.	0,037**
V <sub>4</sub> vs. V <sub>5</sub>	N.S.	N.S.	0,010**
V <sub>2</sub> + V <sub>3</sub> vs. V <sub>4</sub> + V <sub>5</sub>	N.S.	16,71**	0,009**
Error (a)	91,60	4,91	0,006
Nitrógeno	108,03**	706,09**	0,006**
Nitrógeno lineal (NL)	29.536,89**	1.804,56**	0,008**
Nitrógeno cuadrático (NQ)	10.678,68**	743,49**	N.S.
Variedad x N	125,08*	N.S.	N.S.
Tradicional vs. Resto x NL	567,39**	N.S.	0,003*
Tradicional vs. Resto x NQ	N.S.	N.S.	N.S.
V <sub>2</sub> vs. V <sub>3</sub> x NL	N.S.	N.S.	N.S.
V <sub>2</sub> vs. V <sub>3</sub> x NQ	N.S.	N.S.	N.S.
V <sub>2</sub> + V <sub>3</sub> vs. V <sub>4</sub> + V <sub>5</sub> x NL	N.S.	N.S.	N.S.
V <sub>2</sub> + V <sub>3</sub> vs. V <sub>4</sub> + V <sub>5</sub> x NQ	N.S.	N.S.	N.S.
V <sub>4</sub> vs. V <sub>5</sub> x NL	N.S.	N.S.	0,011**
V <sub>4</sub> vs. V <sub>5</sub> x NQ	N.S.	N.S.	N.S.
Error (b)	64,67	2,80	0,006
C.V. (%)	14,08	10,80	7,21

\*, \*\*: valores significativos  $P \leq 0,01$  y  $P \leq 0,05$ , respectivamente, N.S.: nivel de probabilidad  $P > 0,05$ .

**CUADRO 3. Rendimiento en grano (qqm ha<sup>-1</sup> de m.s.) de cinco variedades de trigo en dos temporadas, con diferentes dosis de N aplicado (kg ha<sup>-1</sup> de N). Estación Experimental Carillanca, IX Región**

**TABLE 3. Grain yield (qqm ha<sup>-1</sup> of D.M.) in five wheat cultivars in two growing seasons under different N rates (kg ha<sup>-1</sup> of N). Experimental Station Carillanca, IX Región**

Dosis de N (kg ha <sup>-1</sup> )	Vil-morín	Cunco	Per-quenco	Ta-lafén	Lanco
1988					
0	23,29	20,23	22,18	23,75	22,56
80	43,96	52,67	41,34	58,85	43,33
160	57,25	66,97	74,56	70,99	59,29
320	44,70	55,69	71,07	65,10	59,29
640	41,39	61,10	66,97	58,42	57,52
Promedio	42,11	51,33	55,22	55,42	48,95
1989					
0	25,85	21,88	21,75	19,02	17,59
80	45,89	39,14	54,84	53,15	44,00
160	61,42	60,74	68,62	74,66	67,02
320	63,72	67,72	81,73	65,73	76,14
640	50,55	81,78	82,09	78,91	85,67
Promedio	53,09	54,25	61,81	58,30	58,08

**CUADRO 4. Rendimiento (qqm ha<sup>-1</sup>), producción de fitomasa (ton ha<sup>-1</sup>) e índice de cosecha (%), promedios de dos temporadas en cinco variedades de trigo con diferentes dosis de N-fertilizante (kg ha<sup>-1</sup>) agregado. Estación Experimental Carillanca, IX Región, 1988/89**

**TABLE 4. Mean values of grain yield (qqm ha<sup>-1</sup>), phytomass production (ton ha<sup>-1</sup>) and harvest index (%) of five varieties in two seasons with different N rates (kg ha<sup>-1</sup>). Experimental Station Carillanca, IX Region, 1988/89**

Dosis de N (kg ha <sup>-1</sup> )	Vil-morín	Cunco	Per-quenco	Ta-lafén	Lanco
Rendimiento					
0	26,92	27,55	33,6	21,39	26,47
80	47,10	51,83	58,5	56,00	44,30
160	56,01	64,55	76,5	72,83	59,38
320	54,22	62,86	79,1	65,42	62,98
640	50,53	70,49	71,8	68,67	64,15
Promedio	46,95c	55,46b	63,90a	55,13b	51,46b
Producción de fitomasa					
0	7,8	7,5	7,8	4,9	8,5
80	13,8	13,7	14,1	14,6	13,6
160	15,6	16,9	17,2	17,5	17,6
320	15,2	17,5	17,7	17,0	18,0
640	16,7	19,4	17,5	18,2	17,7
Promedio	13,8a	15,0a	14,8a	14,0a	15,0a
Índice de cosecha					
0	0,34	0,36	0,41	0,42	0,41
80	0,33	0,37	0,41	0,38	0,32
160	0,35	0,35	0,45	0,37	0,37
320	0,35	0,35	0,45	0,37	0,37
640	0,30	0,35	0,41	0,37	0,35
Promedio	0,33b	0,36b	0,42a	0,36b	0,34b

El hecho que la producción de fitomasa total haya sido similar entre la variedad tradicional y Resto y que el contraste variedad tradicional vs. Resto y la interacción var. x N, no fuesen significativos, en las temporadas estudiadas, indica que tanto variedades tradicionales como nuevas presentaron una curva de respuesta y una tasa de incremento en producción de fitomasa similares, al adicionar incrementales de N fertilizante, resultados que también han sido descritos por Austin y otros (1980), al comparar variedades de trigo invernal producidas por el trabajo de fitomejoramiento entre los años 1908 y 1978.

Asimismo, el hecho que el Índice de cosecha (IC) haya sido significativamente diferente entre variedades, y se viese influenciado por N-fertilizante, agregado en ambas temporadas, sugiere que el incremento en rendimiento, en las variedades nue-

vas, se asocia principalmente con un mayor IC y no con un aumento en la producción de fitomasa (cuadros 1 y 2) (Austin y otros, 1980). En el análisis combinado de los ensayos, todas las variedades presentaron un IC diferente y superior a la variedad tradicional Vilmorín 29. Entre las variedades de Resto, Perquenco presentó los mayores valores de IC (Cuadro 4).

En el cultivo de maíz, con una excepción, el rendimiento fue mayor para todos los híbridos con el "sistema convencional", que utilizó la mayor cantidad de N-fertilizante, seguido por el "cultivo intercalado", en el cual el aporte total de N a la planta, considerando el proveniente del trébol rosado, fue similar al aportado en el convencional, en algunas combinaciones localidad-año. Los menores valores de rendimiento y fitomasa total, para todos los híbridos, se obtuvieron con el "sistema bajo nitrógeno",

con la menor adición de N-fertilizante (Cuadro 5). El efecto híbrido fue significativo sólo para rendimiento e Índice de cosecha, pero no así para fitomasa total, respuesta también observada para trigo. La falta de interacción significativa entre híbridos y sistema de producción para fitomasa total, al igual a lo observado para el cultivo de trigo (var. x N) y para rendimiento de grano, también se asemeja a lo encontrado por Austin y otros (1980). Al mismo tiempo indica que estos índices fitométricos, para este tipo de material y en selección para sistemas de cultivo alternativo con la combinación de tratamientos en estos ensayos, no fueron efectivos para discriminar diferencias entre los híbridos frente a ambientes nitrogenados diferentes. Estas respuestas fueron condicionadas por el efecto año. Así, la respuesta de rendimiento y fitomasa total fue similar entre híbridos de maíz dentro de cada temporada. El rendimiento fue mayor en 1991 que en 1992, en conjunto con un mayor valor de IC. Sin embargo, la respuesta de estos dos parámetros, dentro y a través de años, siguió la tendencia de incremento en la medida que se aumentó la cantidad de N-fertilizante aplicado (Cuadro 5).

#### **Eficiencia de uso del nitrógeno**

Para el análisis de la EFN, en el cultivo de trigo, en base a los resultados presentados, se eligieron las variedades más contrastantes, Vilmorin 29 y Perquenco.

El Cuadro 6 muestra que la EAN disminuyó para ambos tipos de variedades en la medida que aumentó la adición de N-fertilizante, siendo esta disminución más marcada sobre la dosis de N aplicado de 160 kg ha<sup>-1</sup>, en la variedad tradicional, y a partir de dosis mayores a 320 kg ha<sup>-1</sup>, en la variedad nueva. Se obtuvo una diferencia significativa en rendimiento y, por consiguiente, en la EAN a favor de la variedad nueva, en todo el rango de N-fertilizante aplicado. La igualdad en producción de fitomasa, en ambas variedades, pero con un IC mayor en la variedad nueva, explicaría esta diferencia en rendimiento.

Por otra parte, el Cuadro 6 muestra que sólo en el rango de 0-80 kg ha<sup>-1</sup> de N aplicado, la relación de absorción de N por la planta por unidad de N aplicado (ERN), fue más alta para la variedad tradicional. Esta relación de eficiencia de recuperación fue siempre superior para la variedad nueva desde el rango de 80 a 160 kg ha<sup>-1</sup> de N, incluso hasta los valores más altos de N aplicado. El mayor valor de ERN se observó para ambas variedades con aplicaciones en el rango de N-fertilizante 80 a 160

kg ha<sup>-1</sup>. La ERN disminuyó con la dosis aplicada mayor a 160 kg ha<sup>-1</sup> de N, lo que indica que aunque las plantas absorbieron más nitrógeno como respuesta a las mayores adicionales de este nutriente, no lo hicieron proporcionalmente, relativo al N aplicado. Este fenómeno pudo ser explicado en estudios de Epstein (1972) y Rao y Rains (1976) por un sistema radical ineficiente en tamaño y función y por una intensificación de los procesos de lixiviación y denitrificación en la rizósfera, inhibiendo la absorción de N por las plantas. La variedad nueva absorbió más N que la variedad tradicional, a igualdad de N aplicado como fertilizante, lo que se tradujo en una ERN superior en rangos de N aplicado más altos. También se observó la tendencia natural a aumentar la absorción de N por las plantas de trigo, en la medida que la aplicación de N-fertilizante se aumentó, lo que, según Hocking (1984), puede ser descrita como una relación de característica lineal en el rango que representa bajas adiciones del nutriente.

Adicionalmente, el Cuadro 6 muestra una diferencia en la relación kg de grano producido por kg de N absorbido (EFN), entre ambas variedades, siendo mayor el valor de esta relación en la variedad Perquenco. Esta variedad no sólo absorbió más N que la planta de la variedad Vilmorin 29 a igualdad de N aplicado, como también en condiciones del nutriente aportado por el suelo (tratamiento testigo), sino que también produjo una mayor cantidad de grano por unidad de N absorbido. En todo el rango de N aplicado se observó menores valores de EFN para la variedad tradicional que para la variedad nueva.

Para el cultivo de maíz, en el rango del tratamiento con bajo abastecimiento de N a las plantas, los tres híbridos produjeron grano con el valor más alto de EFN (Cuadro 7). A bajo nivel de aporte de N a las plantas, éste puede ser diluido en el tejido vegetal a un nivel mínimo, facultando a la planta para utilizar la cantidad disponible en forma óptima (Greenwood, 1976; Rhoads y Stanley, 1984; Van Keulen, 1977). En condiciones de un máximo aporte de N-fertilizante (168 kg ha<sup>-1</sup>, "sistema convencional"), los híbridos presentaron los mayores rendimientos, acompañado de la más baja eficiencia fisiológica de uso de N. Asimismo, se observaron diferencias de EFN entre híbridos a través de localidades y sistemas de cultivo en ambas temporadas (Cuadro 7). Estas diferencias en EFN fueron encontradas por Bundy y Carter (1988) como resultado de variaciones anuales de las condiciones climáticas y sugieren que estas variaciones o respuesta puede ser una característica del híbrido.

**CUADRO 5. Respuesta promedio de tres híbridos de maíz en distintos sistemas de cultivo (convencional, intercalado y con bajo N) en las localidades Aurora y Big Flat, en 1991 y 1992. Estado de Nueva York**

**TABLE 5. Mean performance of three maize hybrids growing on different cropping systems at Aurora and Big Flats localities, in 1991 and 1992. New York State**

Sistema de cultivo	Localidad	Año	Cornell 281			Cargill 4327			Pioneer 3751		
			GRHA — ton ha <sup>-1</sup> —	FTHA	IC %	GRHA — ton ha <sup>-1</sup> —	FTHA	IC %	GRHA — ton ha <sup>-1</sup> —	FTHA	IC %
Bajo N	Aurora	1991	7,41	16,20	0,47	9,81	18,40	0,52	8,89	17,00	0,53
Intercalado	Aurora	1991	9,26	18,60	0,50	10,20	20,30	0,52	10,90	19,20	0,53
Convencional	Aurora	1991	10,90	24,10	0,44	11,20	20,10	0,54	12,60	22,50	0,58
Bajo N	Big Flats	1991	6,91	16,60	0,44	5,89	13,20	0,45	8,70	15,30	0,54
Intercalado	Big Flats	1991	5,75	14,70	0,44	5,55	12,60	0,42	7,47	13,90	0,51
Convencional	Big Flats	1991	9,42	19,70	0,49	9,70	19,30	0,51	11,10	19,60	0,56
Bajo N	Aurora	1992	5,17	20,40	0,28	5,65	19,50	0,29	6,83	20,00	0,32
Intercalado	Aurora	1992	4,87	19,80	0,29	7,27	21,90	0,31	6,35	20,70	0,26
Convencional	Aurora	1992	7,16	26,50	0,30	5,90	21,50	0,29	8,98	24,60	0,32
Bajo N	Big Flats	1992	4,84	18,00	0,32	5,08	17,80	0,28	6,51	18,00	0,33
Intercalado	Big Flats	1992	5,86	22,50	0,28	6,27	22,90	0,27	7,52	22,70	0,31
Convencional	Big Flats	1992	7,32	23,50	0,31	9,59	33,00	0,30	8,81	17,00	0,33
Promedio			7,02	20,00	0,39	7,67	20,00	0,39	8,72	20,00	0,43
DMS 0,05			1,20	N.S.	0,012	1,20	N.S.	0,012	1,20	N.S.	0,012

**CUADRO 6. Absorción de N por la planta (kg ha<sup>-1</sup>), eficiencia agronómica, de recuperación y fisiológica de uso de nitrógeno en variedades tradicional y nueva de trigo, con diferentes dosis de N-fertilizante agregado (kg ha<sup>-1</sup>). Estación Experimental Carillanca, IX Región, 1988/89**

**TABLE 6. N uptake by plant agronomic, recovery and physiological N use efficiency and crop parameters in "traditional" and new wheat cultivar, with different N rates (kg ha<sup>-1</sup>). Experimental Station Carillanca, IX Región, 1988/89**

	Dosis N-fertilizante agregado (kg ha <sup>-1</sup> )				
	0	80	160	320	640
N absorbido planta (kg ha <sup>-1</sup> )					
Variedad tradicional	45,4	82,8	120,6	146,1	138,9
Variedad nueva	57,7	89,0	141,8	176,9	183,8
Eficiencia agronómica <sup>1</sup>					
Variedad tradicional	-	25,37	18,18	8,53	3,68
Variedad nueva	-	32,37	27,43	14,53	6,12
Eficiencia fisiológica <sup>2</sup>					
Variedad tradicional	-	54,27	38,69	27,10	25,24
Variedad nueva	-	82,74	52,49	39,01	31,08
Eficiencia recuperación <sup>3</sup>					
Variedad tradicional	-	0,46	0,47	0,31	0,14
Variedad nueva	-	0,40	0,52	0,37	0,20

<sup>1</sup>Eficiencia agronómica = (kg grano x kg N aplicado-1) x 100.

<sup>2</sup>Eficiencia fisiológica = (kg grano x kg N absorbido-1) x 100.

<sup>3</sup>Eficiencia recuperación = (kg N absorbido x kg N aplicado-1) x 100.

**CUADRO 7. Eficiencia fisiológica de uso de N (EFN) promedio de tres híbridos de maíz creciendo en sistemas de cultivos convencional, intercalado y con bajo N en las localidades de Aurora y Big Flats en 1991 y 1992. Estado de Nueva York**

**TABLE 7. Mean physiological N use efficiency of three maize hybrids growing in three cropping systems at Aurora and Big Flats localities, for 1991 and 1992. New York State**

Sistema de cultivo	Localidad	Año	Cornell 281	Cargill 4327	Pioneer 3751	Promedio
Bajo N	Aurora	1991	63,60	72,23	70,75	68,86
Intercalado	Aurora	1991	42,46	57,12	53,73	51,10
Convencional	Aurora	1991	61,78	71,58	69,73	67,70
Bajo N	Big Flats	1991	51,47	61,92	59,86	57,75
Intercalado	Big Flats	1991	37,67	52,23	48,87	46,26
Convencional	Big Flats	1991	53,90	61,34	60,24	58,49
Bajo N	Aurora	1992	48,83	45,02	47,48	47,11
Intercalado	Aurora	1992	41,68	38,31	40,63	40,21
Convencional	Aurora	1992	45,27	40,00	42,91	42,73
Bajo N	Big Flats	1992	41,59	35,41	38,61	38,54
Intercalado	Big Flats	1992	30,04	28,11	20,97	29,37
Convencional	Big Flats	1992	30,07	28,72	30,39	29,73
DMS 0,05			9,95	9,95	9,95	5,74
Temporada						
1991			54,31	61,66	59,11	
1992			41,99	34,65	37,20	
DMS 0,05			6,03	6,03	6,03	

El mayor rango de valores de la relación unidad de grano producido por unidad de N absorbido, o EFN en trigo, varió entre 54 a 80 kg de grano producido por kg de N absorbido, cuando se aplicó 0-80 kg ha<sup>-1</sup> de N (Cuadro 6), y en maíz, entre 60 a 72 kg de grano producido por kg de N absorbido en el "sistema bajo nitrógeno" con el rango 0-28 kg ha<sup>-1</sup> de N aplicado (Cuadro 7).

Con los datos de rendimiento, absorción de N y niveles de N-fertilizante aplicado para trigo y maíz (cuadros 4 al 7) se construyeron las figuras 1 y 2, que son una presentación gráfica de los datos, sugerida por de Wit (1953), y que ayudan a la interpretación de la variación de EAN y sus componentes ERN y EFN, indicados según la relación (1). Las figuras 1A y 2A reflejan relación entre rendimiento (eje vertical superior) y N aplicado (eje horizontal izquierdo). Las figuras 1B y 2B describen la variación entre N aplicado (eje vertical) y la absorción de N por las plantas (eje horizontal derecho). Las figuras 1C y 2C describen la variación entre el rendimiento (eje vertical superior) y la cantidad total de N absorbido por la planta (eje horizontal derecho). Es obvio que los tres gráficos no son independiente, el tercero (1C ó 2C) ha sido siempre construido de los otros dos, con la eliminación de una variable.

Las variaciones en las relaciones de eficiencia que aquí se observan (figuras 1 y 2) han sido descritas y observadas por Van Keulen (1977, 1981) y Loomis y Connor (1992), para arroz, y maíz y trigo, respectivamente, como también para cebada (Simonis, 1988).

En los gráficos de la Figura 1 se observa que la EFN para la variedad de trigo tradicional, aumentó hasta dosis de N aplicado de 160 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 1C), puesto que la planta no aumentó la producción de grano al absorber más N (Figura 1B). Como resultante, la EAN disminuyó para valores superiores justamente de 160 kg ha<sup>-1</sup> de N aplicado (Figura 1A). La variedad nueva absorbió más N, a dosis superiores de 160 kg ha<sup>-1</sup> aplicado y rindió también más grano (Figura 1A), por lo que obtuvo mayores valores de EFR (Figura 1C), en relación a la variedad tradicional.

En los gráficos de la Figura 2 se observa que el valor de EFN para maíz disminuyó (Figura 2C) en el sector equivalente a dosis de 150 kg de N suministrado, lo que se consiguió bajo el "sistema de cultivo convencional".



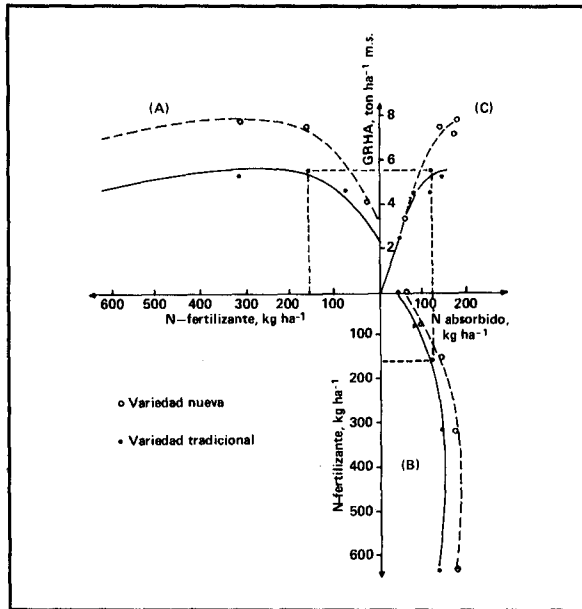


FIGURA 1. Relación (A) entre N-fertilizante aplicado y rendimiento en grano (GRHA, ton ha<sup>-1</sup> de m.s.); (B) entre N-fertilizante aplicado y N absorbido por la planta (N total, kg ha<sup>-1</sup>) y (C) entre N total y GRHA para trigo. IX Región, Chile.

FIGURE 1. Relationships between: (A) N-fertilizer added and grain yield (GRHA, D.M. ton ha<sup>-1</sup>); (B) N-fertilizer added and N absorbed by plant (total N, kg ha<sup>-1</sup>); and (C) nitrogen absorbed by plant and grain yield relationship for wheat. IX Región, Chile.

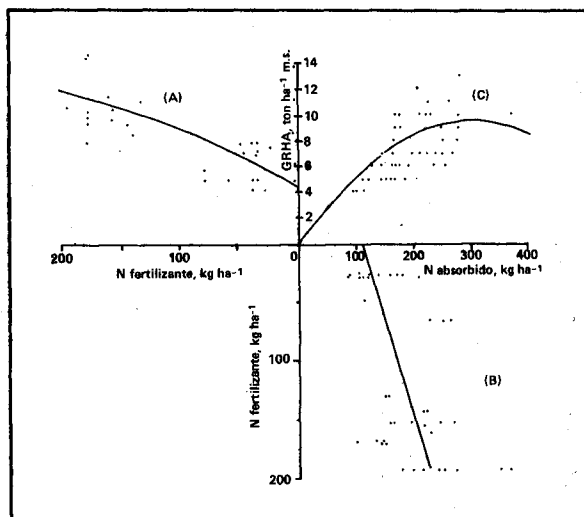


FIGURA 2. Relación (A) entre N-fertilizante aplicado y rendimiento en grano (GRHA, ton ha<sup>-1</sup> de m.s.); (B) entre N-fertilizante aplicado y N absorbido por la planta (N total, kg ha<sup>-1</sup>) y (C) entre N total y GRHA para maíz. Estado de Nueva York, EE.UU.

FIGURE 2. Relationships between: (A) nitrogen fertilizer added and grain yield (GRHA, D.M. ton ha<sup>-1</sup>); (B) N-fertilizer added and N absorbed by plant (total N, kg ha<sup>-1</sup>) and (C) nitrogen absorbed by plant and grain yield for maize. New York State, EE.UU.

En la Figura 2B se observa que aumentó la absorción de N por las plantas, en la medida que lo hizo el abastecimiento de N. Puesto que no se determinó el origen del N proveniente desde las distintas fuentes de N, la ERN debe ser considerada como la relación entre la absorción de N por las plantas y la sumatoria de aquél proveniente tanto de las fuentes inorgánicas (fertilizante) como orgánica (abono verde), que, en este último caso, corresponde al trébol rosado. Lo anterior podría explicar la alta cantidad de N absorbido por la planta, gráficamente determinada, de 119 kg ha<sup>-1</sup> que teóricamente representa el suministro de N por el suelo.

DISCUSION

En el rango alto de aporte de N a las plantas, proveniente de las distintas fuentes de N (suelo y fertilizante), el valor de EFN fue el menor observado en todas las temporadas y condiciones de suelo, y también menor a los valores observados para ERN, resultados que son coincidentes con los de Novoa y Loomis (1981). En ambos cultivos, una absorción mayor de N por la planta, en condición de alta fertilización o alta tasa de mineralización de N-abono verde se tradujo en un aumento en la producción de fitomasa, pero sin incremento proporcional en rendimiento de grano (cuadros 4 y 5), conduciendo a un menor índice de cosecha y, por consiguiente, menor EFN (cuadros 6 y 7).

El material vegetal utilizado en estos estudios, tanto en trigo como en maíz, presentó una estabilidad similar entre genotipos en la respuesta y variación en producción de grano y fitomasa frente a incrementos de N. Austin y otros (1980) y por Kamprath, Moll y Rodríguez (1982), han obtenido similares resultados para trigo y maíz, respectivamente. Sin embargo, la EFN del material evaluado fue un rasgo fitométrico que discriminó interacciones genotipo x ambiente, permitiendo medir que una variedad nueva de trigo, como Perquenco, haya logrado aumentos en GRHA, FTHA e IC a niveles aún altos de suministro de N, con valores también altos de EFN (cuadros 4 y 6), lo que ha sido comprobado también por Isfan (1993), en variedades de avena. Al proyectar sistemas de agricultura sustentable se magnifica la importancia de este tipo de variedad, dado que en condiciones de bajo N aplicado, obtuvo mayores valores de EFN y rendimiento de grano a los corrientemente observados, los que pueden ser representados en este trabajo por los obtenidos por la variedad adicional Vilmorin 29. La variedad tradicional, por su parte, no absorbió más N sobre una cierta concentración en la solución del suelo, lo que disminuyó su ERN y, por consiguiente, su EAN. En condiciones de bajo suministro de N, su ERN parece mayor, lo que la califica como más eficiente,

puesto que recuperó mayor cantidad de N por unidad de N-fertilizante, sin embargo, tanto su EFN como EAN fue notoriamente inferior con respecto a las variedades nuevas.

En el mismo sentido, es importante observar que el híbrido Cargill 4327 presentó sus valores más altos de EFN en condiciones de alto aporte N, "sistemas de cultivo convencional" y "cultivo intercalado", paralelamente con alto rendimiento en grano y fitomasa (cuadros 5 y 7) durante la temporada 1991. El resultado observado con los valores de EFN, tanto para Cargill 4327 y Pioneer 3751 (Cuadro 7), que, a su vez, fueron significativamente mayores en los "sistemas de cultivo bajo N" y "cultivo intercalado" que el "convencional", pero con igual valor de rendimiento de grano en los tres sistemas de cultivo (Cuadro 5), indica que con maíz, en las combinaciones de suelo y clima presente en los experimentos, fue posible sostener una alta producción de grano, paralelamente, con la máxima eficiencia de uso de nitrógeno, evaluada a través de la EFN. Al igual que en el cultivo de trigo este tipo de híbrido sería el más apropiado en cuanto a uso del recurso nutrientes, dada las características del esquema de agricultura sustentable.

### CONCLUSIONES

En condiciones de menor suministro de N, proveniente tanto de N-fertilizante agregado, como de mineralización N orgánico, el material de plantas para las especies de trigo y maíz, evaluado bajo las diferentes condiciones de estos experimentos, produjeron grano con la máxima eficiencia agronómica de uso de N.

El rendimiento en grano y producción de fitomasa para trigo y maíz, no representaron ser índices apropiados para evaluar eficiencia de uso de nitrógeno, que es uno de los criterios en que debe apoyarse

la proyección de esquemas de agricultura sustentable, esto es, incrementar las unidades de producto por unidad de insumo utilizado por la planta, principalmente, a niveles bajos de suministro de N, que, en el caso de nutrientes, debe conseguirse a dosis menores de la dosis óptima económica.

La EFN fue el rasgo fitométrico que permitió identificar el material adaptado a agricultura sustentable, puesto que la obtención de los mayores valores de EFN, que se presentaron en el rango más bajo de N-fertilizante agregado, fueron en conjunto, obtenidos con la máxima productividad física, rendimiento de grano y biológica, fitomasa total, para ambas especies en algunos de los ambientes estudiados en estos experimentos.

No necesariamente el aumento de la EFN implica la obtención de menor rendimiento, como quedó de manifiesto en el cultivo de maíz. En adición, la EFN presentó la mayor variabilidad frente a la diversidad de ambientes usados, indicando la mayor sensibilidad en detectar un valor apropiado de interacción variedad x N recomendable a utilizar en trabajos de fitomejoramiento.

La cantidad de N absorbido por las plantas de trigo y maíz, que representa la disponibilidad de N en un sistema cultivo-suelo particular y su uso en producción de grano, EFN, puede ser un aspecto clave en la selección de material en un programa de fitomejoramiento, para detectar material de alto rendimiento, capaz de explotar el suministro de N más eficientemente, frente a un futuro cercano esquema de agricultura sustentable.

Estudios específicos sobre sistema radicales y translocación de N en la planta deberán acompañar a estudios como el aquí presentado, con el fin de formular la norma de manejo para una agricultura sustentable o de mayor eficiencia en el uso de nutrientes.

### RESUMEN

Se determinó la eficiencia fisiológica de uso de nitrógeno (EFN) en los cultivos de trigo y maíz, manejados con diferentes dosis y fuentes de nitrógeno. Las variedades de trigo e híbridos de maíz evaluados, cuando fueron cultivados con reducidas cantidades de N-fertilizantes agregado, produjeron grano con los valores de EFN más altos, 54-80 y 60-72 kg de grano producido por kg de N absorbido, respectivamente. Bajo las máximas dosis de N-fertilizante aplicado, la EFN obtenida fue la más baja, 25-31 y 20-30 kg de grano producido por kg de N absorbido en trigo y maíz, respectivamente.

La EFN mostró una sensibilidad mayor que las eficiencias de uso agronómico de N y de recuperación de N frente a efectos de genotipo y/o ambientales. El cultivo de trigo mostró un efecto genotípico en su respuesta en EFN, mientras que el cultivo de maíz demostró tanto efectos genotípico y ambiental en su respuesta de EFN.

Algunos de los valores más altos de EFN se presentaron en conjunto con los mayores rendimiento en grano, lo que debe ser visto como una posibilidad a utilizar en selección de material adaptado a con-

diciones de agricultura sustentable. Este trabajo se basa en uno de los conceptos que definen agricultura sustentable, el que considera mejorar la relación general insumo-producto, en términos de una mayor eficiencia de uso de nutrientes por los cultivos.

**Palabras claves:** trigo, maíz, eficiencia de uso de N, eficiencia agronómica de uso de N, eficiencia de recuperación de N, eficiencia fisiológica de uso de N, agricultura sustentable, sistema de cultivo, índice de cosecha.

#### LITERATURA CITADA

- ANDERSON, E.L.; KAMPRATH, E.J. and MOLL, R.H. 1984. Nitrogen fertility effects on accumulation, remobilization and partitioning of N and dry matter in corn genotype differing in prolificacy. *Agron. J.* 76: 397-404.
- AUSTIN, R.B.; BINGHAM, J.; BLACKWELL, R.D.; EVANS, L.T.; FORD, M.A.; MORGAN, C.L. and TAYLOR, M. 1980. Genetic improvements in winter yields since 1900 and associated physiological changes. *J. Agric. Sci., Camb.* 94: 675-689.
- BOCK, B.R. 1984. Efficient use of nitrogen in cropping systems. In: Hauck R.D. (ed.). *Nitrogen in crop production*. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI. p.: 273-294.
- BUNDY, L. and CARTER, P.R. 1988. Corn hybrid response to nitrogen fertilization in the Northern corn belt. *J. Prod. Agric.* 1: 99-104.
- EPSTEIN, E. 1972. *Mineral nutrition of plants. Principles and perspectives*. John Wiley and sons, New York. 421 p.
- EVANS, L.T. 1980. The natural history of crop yield. *Amer. Scient.* 68: 388-397.
- GOMEZ, K. and GOMEZ, A. 1976. *Statistical procedures for agricultural research, with emphasis on rice*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines. 294 p.
- GREENWOOD, E.A.N. 1976. Nitrogen stress in plants. *Adv. Agron.* 28: 1-33.
- HOCKING, P.J. 1984. Nitrogen nutrition of non-leguminous crops. A review. *Field Crop Abstract* 37: 625-741.
- ISFAN, D. 1993. Genotypic variability for physiological efficiency index of nitrogen in oats. *Plant and Soil* 154: 53-59.
- KAMPRATH, E.J.; MOLL, R.H. and RODRIGUEZ, N. 1982. Effects of nitrogen fertilization and recurrent selection on performance of hybrid populations of corn. *Agron. J.* 74: 955-958.
- LOOMIS, R.S. and CONNORS, D.J. 1992. *Crop ecology: productivity and management in agricultural systems*. Cambridge University Press. Melksham, England. 538 p.
- MOLL, R.H.; KAMPRATH, E.J. and JACKSON, W.A. 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agron. J.* 74: 562-564.
- NOVOA, R. and LOOMIS, R.S. 1981. Nitrogen and plant production In: Montheith J. and C. Webb (ed.). *Soil water and nitrogen in mediterranean type environment*. Martinus Nijhauff and Junk Publishers. The Hague. p.: 177-204.
- PINO, I. 1979. *Economía del nitrógeno en cultivares de trigo (Triticum aestivum L.) y triticales (Triticosecale sp.)*. Universidad Católica de Chile, Escuela de Agronomía. 54 p. (Tesis M.S.).
- RAO, K.P. and RAINS, D.W. 1976. Nitrogen nutrition and grain production in two spring wheat genotypes differing in nitrate reductase activity. *Crop Sci.* 17: 283-286.
- RHOADS, F.M. and STANLEY, R.L. 1984. Yield and nutrient utilization efficiency of irrigated corn. *Agron. J.* 76: 219-223.
- RITCHIE, W. and HANWAY, J.J. 1973. *How a corn plant develops*. Iowa State University. Cooperative Extension Service Ames, Iowa. Special Report N° 48. 21 p.
- STOUT, B.A. 1990. *Handbook of energy for world agriculture*. Elsevier Applied Science London. p.: 50-91.
- SIMONIS, A.D. 1988. Studies in nitrogen use efficiency in cereals. In: Jenkinson, D.S. and Smith, K.A. (ed.). *Proceedings Symposium Edinburgh, UK*. Elsevier Applied Science Publishers. p.: 110-124.
- TILLMAN, B.A.; PAN, W.L. and ULRICH, S.E. 1991. Nitrogen use by northern-adapted barley genotypes under no-till. *Agron. J.* 83: 194-201.
- VAN KEULEN, H. 1977. Nitrogen requirements of rice with special reference to Java. *Contr. Centr. Res. Inst. Agric. Bogor.* N° 30. 76 p.
- VAN KEULEN, H. 1981. Modelling the interaction of water and nitrogen. In: Montheith, J. and C. Webb (ed.). *Soil water and nitrogen in mediterranean environment. Developments in plant and soil sciences*. Vol. 1. Nijhauff and Junk Publishers. The Hague. p.: 205-229.
- WITT, C.T. DE. 1953. A physical theory on placement of fertilizer. *Agric. Res. Rep.* 59: 1-71.
- ZADOK, J.C.; CHANG, T.T. and KONZAK, C.F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14: 415-421.
- ZOBEL, R.W.; WRIGHT, M.W. and GAUCH, H.G. 1988. Statistical analysis of yield trial. *Agron. J.* 80: 388-346.